

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em âmbito municipal: concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira)

NATALINO VIEIRA DE VASCONCELOS ALMEIDA

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
MODELAÇÃO TERRITORIAL APLICADOS AO ORDENAMENTO**

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em âmbito municipal: concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira)

NATALINO VIEIRA DE VASCONCELOS ALMEIDA

Relatório de estágio orientada pelo
Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis

Estágio Elaborado na Municípiã, E.M, S. A. -Empresa de
Tecnologia e Informação Geográfica



**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
MODELAÇÃO TERRITORIAL APLICADOS AO ORDENAMENTO**

2013

Dedico esta dissertação aos meus pais, primeiramente pela vida que me deram e pelos esforços feitos para me proporcionar condições para que esteja neste momento a concluir esta dissertação. Aos meus irmãos pelo afecto, carinho e apreço que sempre me demonstram, aos meus tios, tias, primos, primas e aos meus avós e avôs e amigos.

Índice Geral

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | III |
| ÍNDICE DE QUADROS | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS DO ANEXO | IX |
| ÍNDICE DE QUADROS DO ANEXO | IX |
| AGRADECIMENTOS | XI |
| ABREVIATURAS | XIII |
| RESUMO | XV |
| ABSTRACT | XVII |
| | |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| O CONTEXTO DE REALIZAÇÃO DO ESTÁGIO | 3 |
| ENQUADRAMENTO LEGAL DOS PLANOS MUNICIPAIS DE EMERGÊNCIA DE PROTECÇÃO CIVIL (PME – PC)..... | 4 |
| CAPÍTULO I – ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA GERAL | 7 |
| 1. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO | 7 |
| 2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA GERAL | 9 |
| 2.1. Geologia | 9 |
| 2.2. Relevo | 11 |
| 2.3. Clima | 13 |
| 2.4. Hidrografia..... | 19 |
| 2.5. Ocupação do Solo..... | 21 |
| CAPÍTULO II – INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO..... | 25 |
| 1. A AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS | 25 |
| 2. PROCESSO DE CRIAÇÃO DA CARTOGRAFIA DOS DESLIZAMENTOS (VARIÁVEL DEPENDENTE) | 26 |
| 2.1. Inventariação dos Deslizamentos | 26 |
| 3. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES | 28 |
| 3.1. O Modelo Digital do Terreno e as Variáveis Derivadas | 28 |
| 3.2. Processamento das Variáveis Qualitativas | 32 |
| CAPÍTULO III - MOVIMENTOS DE VERTENTE: CARACTERÍSTICAS E FACTORES CONDICIONANTES..... | 43 |
| 1. OS MOVIMENTOS DE VERTENTE..... | 43 |
| 1.1. Conceitos Gerais | 43 |
| 1.2. Características dos Deslizamentos Inventariados..... | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 2. FACTORES CONDICIONANTES E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DESLIZAMENTOS | 47 |
| 2.1. Declives | 48 |
| 2.2. Exposição das Vertentes | 50 |
| 2.3. Morfologia das Vertentes | 51 |
| 2.4. Litologia | 53 |
| 2.5. Solos | 55 |
| 2.6. Ocupação do Solo | 56 |
| CAPÍTULO IV – AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS | 59 |
| 1. MODELO CONCEPTUAL DO RISCO | 59 |
| 1.1. MÉTODOS ESTATÍSTICOS | 60 |
| 2. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS QUALITATIVAS | 61 |
| 3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO | 63 |
| 4. MODELO DE SUSCEPTIBILIDADE AOS MOVIMENTOS DE VERTENTE..... | 71 |
| 5. VALIDAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE: CURVAS DE SUCESSO E PREDIÇÃO..... | 75 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 81 |
| BIBLIOGRAFIA | 84 |
| ANEXOS..... | 91 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Localização geográfica do Arquipélago da Madeira. | 7 |
| Figura 2 - Enquadramento dos municípios da área de estudo na Ilha da Madeira. | 9 |
| Figura 3 - Geologia Simplificada da Ilha da Madeira. | 10 |
| Figura 4 - Altitude da Ilha da Madeira. | 11 |
| Figura 5 - Altitude da área de estudo. | 12 |
| Figura 6 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Média da Ilha da Madeira. | 14 |
| Figura 7 - Distribuição espacial da Temperatura Média Anual da Ilha da Madeira. | 15 |
| Figura 8 - Localização das Estações Meteorológicas utilizadas. | 16 |
| Figura 9 - Regime termopluviométrico da estação meteorológica de Bica da Cana. | 17 |
| Figura 10 - Regime termopluviométrico da estação de Lugar de Baixo. | 17 |
| Figura 11 - Regime termopluviométrico da Estação de Ponta Delgada. | 18 |
| Figura 12 - Rede hidrográfica da Ilha da Madeira. | 20 |
| Figura 13 - Frequência relativa das classes de ocupação do solo na ilha da Madeira. | 22 |
| Figura 14 - Ocupação do Solo na Ilha da Madeira. | 23 |
| Figura 15 - Distribuição do declive (em graus) nos concelhos da área de estudo. | 29 |
| Figura 16 - Exposições das vertentes nos concelhos da área de estudo. | 30 |
| Figura 17 - Perfis Transversais das vertentes nos concelhos da área de estudo. | 31 |
| Figura 18 - Unidades Litológicas (reclassificadas) nos concelhos da área de estudo. | 35 |
| Figura 19 - Distribuição espacial dos grupos de solos nos concelhos da área de estudo. | 38 |
| Figura 20 - Ocupação do Solo nos concelhos da área de estudo. | 40 |
| Figura 21 - Tipologia dos Movimentos de Vertente. | 44 |
| Figura 22 - Distribuição dos deslizamentos baseado em fotointerpretação nos concelhos da área de estudo. | 47 |
| Figura 23 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de declive (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de declive (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo. | 49 |
| Figura 24 - Proporção de área de cada classe de declive afectada por deslizamentos nos concelhos da área de estudo. | 50 |
| Figura 25 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de exposições (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de exposições (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo. | 51 |
| Figura 26 - Proporção de área de cada classe de exposição das vertentes afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de perfil transversal das vertentes (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de perfil transversal das vertentes (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo..... | 52 |
| Figura 28 - Proporção de área de cada classe de perfil transversais de vertentes afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo. | 53 |
| Figura 29 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de unidades litológicas (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de unidades litológicas (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo.. | 54 |
| Figura 30 - Proporção de área de cada classe de unidades litológicas afectadas por deslizamentos nos Concelhos da área de estudo.. | 54 |
| Figura 31 - Frequência relativa (%) da área de cada classe dos grupos de solos (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe dos grupos de solos (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo..... | 55 |
| Figura 32 - Proporção de área de cada classe de grupo de solos afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo..... | 56 |
| Figura 33 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de ocupação do solo (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de ocupação do solo (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo..... | 57 |
| Figura 34 - Proporção de área de cada classe de ocupação do solo afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo..... | 57 |
| Figura 35 - Esquema conceptual do risco natural. | 60 |
| Figura 36 - Métodos cartográficos de avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na escala regional..... | 60 |
| Figura 37 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de declive (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo..... | 68 |
| Figura 38 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de exposições das vertentes (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo. | 69 |
| Figura 39 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de perfil transversal das vertentes (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo..... | 69 |
| Figura 40 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de unidades litológicas (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo. | 70 |
| Figura 41 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de grupos de solos (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo. | 70 |
| Figura 42 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de ocupação do solo (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo. | 71 |
| Figura 43 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos (valores contínuos), segundo o método do Valor Informativo, nos concelhos da área de estudo..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 44 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quebras naturais, nos concelhos da área de estudo. | 74 |
| Figura 45 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quartis, nos concelhos da área de estudo. | 75 |
| Figura 46 - Repartição espacial aleatória dos deslizamentos utilizados na modelação da taxa de predição | 76 |
| Figura 47 - Curva de sucesso e Curva de predição do modelo de avaliação da susceptibilidade aos deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo..... | 79 |

Índice de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - População e densidade populacional na RA da Madeira, na Ilha da Madeira e nos municípios da área de estudo. | 8 |
| Quadro 2 - Área (km ²) e frequência relativa (%) por classe de altitude nos concelhos da área de estudo. | 13 |
| Quadro 3 - Síntese da Informação de Base. | 25 |
| Quadro 4 - Área (ha) e frequência relativa (%) dos declives (°) nos concelhos da área de estudo. | 32 |
| Quadro 5 - Generalizações das classes de unidades litológicas nos concelhos da área de estudo. Fonte: Carta Geológica da Ilha da Madeira..... | 33 |
| Quadro 6 – Área (ha) e frequência relativa (<i>Fi</i>) das unidades litológicas (reclassificadas) presentes nos concelhos da área de estudo..... | 37 |
| Quadro 7 – Área (ha) e frequência relativa dos solos (grupos) nos concelhos da área de estudo. | 39 |
| Quadro 8 – Área (ha) e frequência relativa das classes de ocupação do solo nos concelhos da área de estudo. | 41 |
| Quadro 9 – Características do inventário de deslizamentos nos concelhos da área de estudo.... | 47 |
| Quadro 10 - Grau de associação entre factores de predisposição à ocorrência dos deslizamentos na área de estudo, medido através do Coeficiente de Contingência Modificado (C*)..... | 62 |
| Quadro 11 - Valor Informativo (<i>scores</i>) para cada classe das variáveis derivadas do MNE (declive, exposição e forma das vertentes) na área de estudo. | 65 |
| Quadro 12 - Valor Informativo (<i>scores</i>) para cada classe das variáveis qualitativas..... | 66 |
| Quadro 13 - Matriz de classificação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quebras naturais. | 73 |
| Quadro 14 - Matriz de classificação da susceptibilidade aos deslizamentos segundo o método do Valor Informativo, segundo a divisão de classes por quartis. | 73 |
| Quadro 15 - Percentagem de deslizamentos correctamente classificados e as respectivas AAC79 | |

Índice das Figuras do Anexo

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Santana: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 91 |
| Figura 2 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Porto Moniz: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 92 |
| Figura 3 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 93 |
| Figura 4 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 93 |
| Figura 5 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de São Vicente: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 94 |
| Figura 6 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Porto Moniz: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010. | 95 |

Índice de Quadro do Anexo

| | |
|--|----|
| Quadro 1- Modo de elaboração da taxa de sucesso com base em condições hipotéticas. | 91 |
|--|----|

Agradecimentos

Primeiro de tudo, agradeço a DEUS pela força, coragem e determinação que me emprestou durante as fases menos boas ao longo da minha vida académica, que fez com que acreditasse que era possível chegar a esta etapa da minha vida.

À MINHA FAMÍLIA, especialmente à minha MÃE, pelo amor incondicional que, mesmo à distância, sempre me deu e por me transmitir valores indispensáveis para que pudesse vencer. Um agradecimento especial também ao meu PAI, que, mesmo longe, nunca pude esquecer as suas palavras que desde criança ouvia repetidamente: “sem estudos não somos nada”. Aos meus IRMÃOS, pelo carinho e amor que sempre demonstraram por mim.

Ao meu ORIENTADOR, Professor Eusébio Reis, um agradecimento especial por todos os momentos de compreensão, encorajamento, empenho, dedicação, competência e sobretudo pela disponibilidade que sempre demonstrou. Mas também pelas conversas e esclarecimentos de alguns assuntos sobre a dinâmica de vertentes e pela facultações de bibliografia, que foram importantes para a compreensão do tema estudado. Aos meus professores de mestrado, pelo rigor com que me transmitiram a partilha de conhecimento.

À MUNICÍPIA, enquanto instituição de acolhimento do estágio, agradeço a criação de condições e a disponibilidade de todo o material necessário para a concretização deste trabalho. Endereço um agradecimento para toda a equipa da Divisão de Informação Geográfica, em especial a Teresa Zuna, Frederico e Hélder que sempre demonstraram o seu apoio no decorrer do estágio.

Ao Dr. Nelson Mileu, que permitiu que a realização do estágio na Município fosse possível e contribuiu para que o estágio tenha ocorrido em um ambiente harmonioso, e sobretudo num contexto do mestrado, também um agradecimento especial, pela disponibilidade demonstrada.

Ao Professor Jorge Rocha pela disponibilidade demonstrada em esclarecer algumas dúvidas e pela ajuda na compreensão da funcionalidade do *software* SIG. Ao Professor Ricardo Garcia pela facultações de alguma bibliografia relacionada com o tema deste estudo e pela disponibilidade de esclarecer algumas dúvidas.

Aos Colegas do Mestrado que compartilharam comigo momentos de aprendizado e confraternização.

Por fim um agradecimento para todos aqueles que indirectamente me apoiaram.

Abreviaturas

AAC – Área Abaixo da Curva

AMRAM – Associação dos Municípios da Região Autónoma da Madeira

ANPC – Autoridade Nacional de Protecção Civil

AREAM-RAM – Agência Regional de Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira

COS – Carta Ocupação do Solo

DRA-RAM – Direcção Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira

DRCC-RAM – Direcção Regional de Cartografia e Cadastro da Região Autónoma da Madeira

DRE-RAM – Direcção Regional de Estatística da MadeiraRegião Autónoma da Madeira

DRF-RAM – Direcção Regional da Floresta da Região Autónoma da Madeira

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

IGP – Instituto Geográfico Português Actual Direcção-Geral do Território

IICT – Instituto de Investigação Científica Tropical

IM – Instituto de Meteorologia (actual IPMA)

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MDT – Modelo Digital de Terreno

PDM – Plano Director Municipal

PME-PC – Plano Municipal de Emergência de Protecção Civil

PNE-PC – Plano Nacional de Emergência de Protecção Civil

PROT-RAM – Plano Regional de Ordenamento do Território da Região Autónoma da Madeira

RAM – Região Autónoma da Madeira

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SRA-RAM – Secretaria Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira

SRARN-RAM – Serviço Regional de Ambiente e Recursos Naturais da Região Autónoma da Madeira

TIN – Triangular Irregular Network

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VI – Valor Informativo

WP/WLI - Working Party on World Landslide Inventory

Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em âmbito municipal: concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira)

Natalino Vieira de Vasconcelos Almeida

Resumo

Este trabalho aborda a temática dos riscos ambientais, mais concretamente os riscos de movimentos de vertentes (deslizamentos), nos municípios de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira). O estudo efectuado utiliza uma metodologia que assenta em um algoritmo de base estatística para avaliação de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, enquadrado na elaboração dos Planos Municipais de Emergência de Protecção Civil (PME-PC) dos referidos municípios.

A aquisição de um conjunto de dados de base através de processos de digitalização, georreferenciação, vectorização e edição, e posteriormente a sua transformação para estrutura matricial, possibilitou a construção e processamento de uma base de dados funcional e relacional, procedimentos fundamentais para este tipo de estudo.

A construção e utilização de um inventário de deslizamentos ocorridos efectuado através de levantamentos em ortofotos de grande resolução contribuiu para conhecer a distribuição espacial e as suas características. Assim, procedeu-se a análise espacial entre o cruzamento dos deslizamentos, entendido como variável dependente, e um conjunto de 6 factores de predisposição para a instabilidade: declive, exposições das vertentes, solos, ocupação do solo, forma das vertentes e unidades litológicas. Desta análise, obteve-se as proporções das áreas instabilizadas e a probabilidade condicionada de cada classe de cada factor condicionante.

A avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos na área de estudo baseou-se na integração dos dados efectuados através do método estatístico Valor Informativo. Este método, de aplicação relativamente simples, foi entendido como o mais adequado para estudo desta índole, uma vez que possibilita avaliar quantitativamente o grau de susceptibilidade.

Os resultados obtidos através das curvas de sucesso e validados pela curva de predição revelaram ser aceitáveis, mas, mesmo assim, aquém do desejável para estudos deste âmbito. No entanto, as respectivas AAC apresentam valores relativamente elevados, mostrando que o modelo apresenta uma qualidade aceitável.

A área de estudo apresenta níveis de susceptibilidade elevada de ocorrência de deslizamentos, situação que se prende essencialmente com a presença de declives muito elevados, assim como com a existência, em simultâneo, de derrames lávicos de composição máfica (essencialmente basaltos e basanitos), e de outros materiais de natureza vulcânica, em geral com graus de alteração apreciáveis.

Palavras-chave: Susceptibilidade, Deslizamentos, Valor Informativo, Planos Municipais de Emergência, Ilha da Madeira

**Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos em âmbito municipal:
concelhos de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Ilha da Madeira)**

Natalino Vieira de Vasconcelos Almeida

Abstract

This work is focused on the issue of environmental risks, specifically the risk of slope movements (landslides) in the municipalities of Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana and São Vicente (Madeira Island). The study conducted using a methodology based on a statistical-base method for landslide susceptibility evaluation, framed in the preparation of Municipal Emergency Plans for Civil Protection (PME-PC) of the referred municipalities.

The acquisition of a base dataset through processes of scanning, geo-referencing, vectorization and edition, and subsequently its transformation to a raster structure, enabled the construction and processing of a functional and relational database, fundamental procedures for this type of study.

The construction and use of a landslide inventory, conducted through surveys using high resolution orthophotos, contributed to know the spatial distribution and its characteristics. Thus, we proceeded to the spatial analysis of the intersection between landslides, understood as dependent variable, and a set of 6 predisposing factors for instability: slope, aspect, soils, land use, slope profile and lithological units. From this analysis, the ratios of the instabilized areas and conditional probability of each class for each conditioning factor were obtained.

The susceptibility assessment to the landslide occurrence in the study area was based on data integration performed by the statistical method Informative Value. This method, relatively simple, was perceived as the most suitable for this kind of study, since it allows evaluating quantitatively the degree of susceptibility.

The obtained results from the success curve and validated by prediction curve proved to be acceptable, but still fell short for this type of studies. However, their respective area under the curve (AUC) exhibit relatively high values, indicating that the model presents an acceptable quality.

The study area presents high landslide susceptibility occurrence, a situation which relates primarily to the presence of very high slopes, as well as the existence, simultaneously, of lava materials with mafic composition (essentially of basaltic nature), and other volcanic materials, usually with considerable degrees of alteration.

Keywords: Susceptibility, Landslides, Informative Value, Municipal Emergency Plan, Madeira Island

Introdução

Os movimentos de vertentes são considerados como “movimentos de descida (gravíticos), numa vertente, de uma massa de rocha ou solo em que o centro de gravidade do material afectado progride para jusante a para o exterior” (Terzaghi, 1953; Varnes, 1978; Cruden, 1991). A ocorrência de precipitação intensa e ou prolongada funcionam como factor desencadeante dos movimentos.

Na Ilha da Madeira, devido às suas características físicas inerentes à sua natureza associada a ocorrência de chuvas intensas, sucedem-se episódios de movimentos de vertente de grandes magnitudes com enorme poder destruidor, com consequências gravosas, provocando enormes danos em equipamentos e infra-estruturas e por vezes causando perdas de vidas humanas.

No sentido de mitigar e atenuar os danos e perdas, foram instituídos e implementados diversos planos e instrumentos de gestão, planeamento e ordenamento do território, onde se enquadram os Planos Municipais de Emergência de Protecção Civil (PME-PC), pelas diversas instituições de poder local e central, de forma a identificar as áreas de maiores riscos a determinados fenómenos perigosos, para que se faça uma utilização e ocupação racional e harmoniosa do território.

A importância dada à avaliação dos riscos naturais tem sido crescente, resultado de uma maior consciencialização quer das entidades com responsabilidade no planeamento e ordenamento do território, quer dos decisores e técnicos que trabalham na gestão dos riscos. A inclusão de cartografia de riscos naturais em alguns planos de gestão territorial evidencia essa tomada de consciência, que surgiu com a necessidade da preservação da vida humana bem como dos bens materiais.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma ferramenta de grande importância no que tange aos mais diversos estudos, e em particular os de natureza geográfica. A utilização de SIG tem possibilitado o desenvolvimento de modelos de avaliação de susceptibilidade cada vez mais complexos, baseados em métodos quantitativos, pois permite o cruzamento de um grande número de temas cartográficos e a análise estatística da relação entre os deslizamentos conhecidos e as variáveis independentes espacializadas (Reis *et al.*, 2003).

Neste trabalho pretende-se atingir os seguintes objectivos:

- a) Aplicar e aprofundar os conhecimentos relativos à aquisição e processamento de informação geográfica, nomeadamente através de utilização de métodos compatíveis para a delimitação e identificação dos movimentos de vertente, para vectorização da informação cartográfica e para derivação de variáveis a partir de Modelo Numérico de Elevação (MNE);
- b) Efectuar a integração de informação geográfica de natureza distinta, com vista ao conhecimento das condições que influenciam os movimentos de vertente, em particular os deslizamentos, no contexto de quatro municípios da Ilha da Madeira (Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente);
- c) Aplicar metodologia(s) para integração da informação com vista à avaliação quantitativa da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos à escala municipal e proceder à validação dos resultados obtidos;
- d) Elaborar cartografia de susceptibilidade, para análise de risco, com recurso a SIG.

No primeiro capítulo procura-se efectuar, de forma sucinta, o enquadramento geral da área de estudo, bem como a sua caracterização física geral.

A aquisição e processamento dos diversos dados utilizados na modelação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos são apresentados no capítulo II. Os principais métodos de recolha de informação em que se baseou o estudo, bem como as classificações efectuadas e os critérios de levantamentos dos deslizamentos, são outro assunto aqui abordado.

No capítulo III faz-se uma breve abordagem à terminologia e aos conceitos relacionados com os movimentos de vertente. As análises estatísticas dos movimentos inventariados são abordadas nos pontos 2 e 3 deste capítulo. As análises espaciais efectuadas sobre a relação entre os movimentos ocorridos e factores condicionantes como o declive, a exposições das vertentes, a ocupação do solo, as unidades litológicas e os grupos de solos, são outros dos assuntos retratados neste capítulo.

No capítulo IV pretende-se apresentar de forma sucinta e sintetizada os conceitos associados com a avaliação do risco de movimentos de vertente. As relações entre as variáveis independentes são aqui apresentadas e analisadas. Ainda neste capítulo, realiza-se a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos na área de

estudo, através do método de cartografia indirecta, de base estatística, considerado mais objectivo para o efeito: o método do Valor Informativo. Por fim, com base nos resultados deste método é realizada a avaliação das taxas de sucesso e da capacidade preditiva dos futuros deslizamentos na área de estudo.

O Contexto de Realização do Estágio

Este estágio curricular insere-se no âmbito do 2.º ano do mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial aplicados ao Ordenamento (SIGMTO) e decorreu na empresa Municípia, E.M, S.A. (<http://www.municipia.pt/>), mais concretamente na sua Divisão de Informação Geográfica (DIG).

Neste contexto, foi realizado para a Associação de Municípios da Região Autónoma da Madeira (AMRAM) o trabalho que incide na avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, no âmbito da elaboração dos Planos Municipal de Emergência da Protecção Civil (PME – PC) para os municípios de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente.

Enquadramento Legal dos Planos Municipais de Emergência de Protecção Civil (PME – PC).

O Plano Municipal de Emergência (PME-PC) tem como objectivos fundamentais a adopção de medidas que, em caso de acidente grave ou catástrofe, atenuem os efeitos dos danos humanos e materiais, não só através da definição de uma estrutura operacional com procedimentos de actuação próprios no socorro de emergência, mas também através de uma intervenção preventiva ao nível das estruturas físicas e sociais (Autoridade Nacional da Protecção Civil, 2009a e 2009b; Julião *et al.*, 2009).

O Plano Municipal de Emergência de Protecção Civil enquadra-se na Lei n.º 65/2007, de 12 de Novembro, publicada no Diário da República, n.º 217, I Série, estando ainda enquadrado na sua elaboração e operacionalização pela Lei n.º 27/2006, de 3 de Julho, publicada no Diário da República, n.º 126, I Série (Lei de Bases da Protecção Civil).

Sendo um plano municipal, está sujeito a actualização sempre que for necessário e conforme os termos legais, tendo em conta o disposto no Decreto-Lei n.º 134/2006, de 25 de Julho, publicado no Diário da República, n.º 142, I Série.

A sua elaboração deverá seguir a Directiva relativa aos critérios e normas técnicas para a elaboração e operacionalização de Planos de Emergência de Protecção Civil, aprovada pela Resolução n.º 25/2008, de 18 de Julho, da Comissão Nacional de Protecção Civil, publicada no Diário da República, n.º 138, II Série.

Por conseguinte, a sua elaboração deve ter em consideração a articulação com outros instrumentos de gestão, planeamento e ordenamento do território, de âmbito nacional, regional ou municipal, designadamente:

- Planos Regionais de Ordenamento do Território (PROT);
- Plano Nacional de Emergência de Protecção Civil (PNE-PC);
- Plano Director Municipal (PDM).

O presente caso de estudo, além dos pressupostos legislativos e directivos supra-referidos, enquadra-se ainda nas seguintes normas regionais:

- O Decreto Legislativo Regional n.º 17/2009/M, de 30 de Junho de 2009, que cria o Serviço Regional de Protecção Civil, IP -RAM e aprova a respectiva orgânica;
- Decreto Legislativo Regional n.º 16/2009/M, de 30 de Junho de 2009, que aprova o regime jurídico do Sistema de Protecção Civil da Região Autónoma da Madeira.

No que concerne aos movimentos de vertente, enquadra-se de acordo com o decreto-lei nº 192/2012, de 03 de Agosto, corrigido e complementado pelo decreto-lei nº 239, que estabelece o regime jurídico da Reserva Ecológica Nacional (REN), o qual define que as áreas de instabilidade das vertentes são “as áreas que, devido às suas características de solo e subsolo, declive, dimensão e forma da vertente ou escarpa e condições hidrogeológicas, estão sujeitas à ocorrência de movimentos de massa em vertentes, incluindo os deslizamentos, os desabamentos e a queda de blocos” (Diário da República, 1ª série Nº 162 – 22 de Agosto, Secção III, alínea e). Na delimitação de áreas de instabilidade de vertentes devem considerar-se as suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas.

CAPÍTULO I – ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA GERAL

1. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no arquipélago da Madeira; este localiza-se no sector Oriental do Atlântico Norte entre as latitudes 30°01' e 33°08' N e longitudes 15°51' e 17°16' W, a SE do arquipélago dos Açores e SW de Portugal Continental (Fig. 1). Apresenta uma área total de 810,7 km², a maior parte constituída pela Ilha da Madeira com cerca de 750,7 km², com um comprimento aproximadamente de cerca 58 km entre a Ponta de Pargo e a Ponta de São Lourenço segundo a direcção E-W e uma largura de 23 km entre o arco de São Jorge e a Ponta da Cruz a Oeste de Funchal segundo a direcção N-S. A restante área corresponde à Ilha de Porto Santo, situada no extremo NE do arquipélago, com cerca de 42,2 km², e ainda a mais dois grupos de Ilhas desabitadas, as Desertas (14,2 km²) e as Selvagens (3,6 km²), estas últimas a 250 km a SSE da extremidade leste da Ilha da Madeira.

O arquipélago da Madeira ocupa uma posição central no Atlântico Oriental, onde, conjuntamente, com os arquipélagos de Açores, Canárias e Cabo Verde formam a área biogeográfica denominada de Macaronésia.

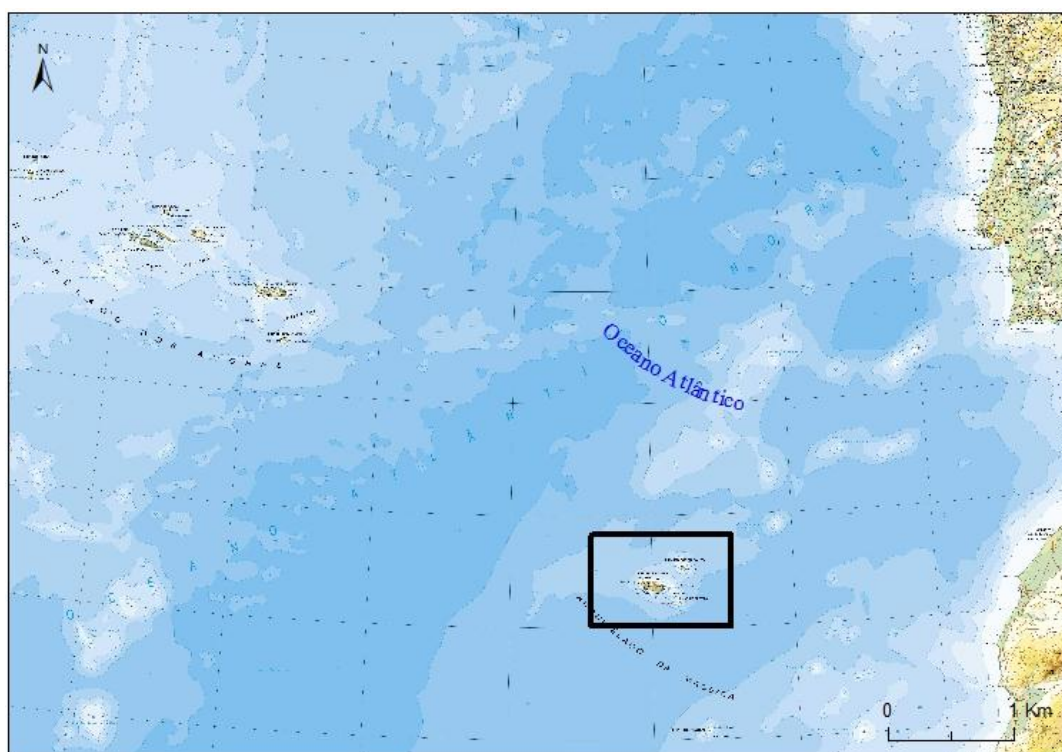


Figura 1 - Localização geográfica do Arquipélago da Madeira.

Fonte: http://www.igeo.pt/e-IGEO/egeo_downloads.htm (IGP)

A área de estudo é composta pelos municípios de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente (Fig. 2), os quais ocupam 322,6 km² (40,3% da Região e 42,7% da Ilha da Madeira); segundo os Censos de 2011 (dados provisórios, INE e DREM) residiam nestes 4 municípios 29 589 habitantes (cerca de 92 hab/km²), ou seja, apenas 11% da Região e 11,3% da Ilha da Madeira (Quadro 1).

Quadro 1 - População e densidade populacional na RA da Madeira, na Ilha da Madeira e nos municípios da área de estudo (Dados provisórios dos Censos de 2011, DREM).

| Municípios | População Residente (2011) | Área (km²) | Densidade Populacional (km/km²) |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|
| R.A. da Madeira | 267 938 | 810,7 | 334,5 |
| Ilha da Madeira | 262 456 | 750,7 | 349,6 |
| Porto Moniz | 2 711 | 82,9 | 91,9 |
| Ribeira Brava | 13 362 | 65,4 | |
| Santana | 7 795 | 95,5 | |
| São Vicente | 5 721 | 78,8 | |

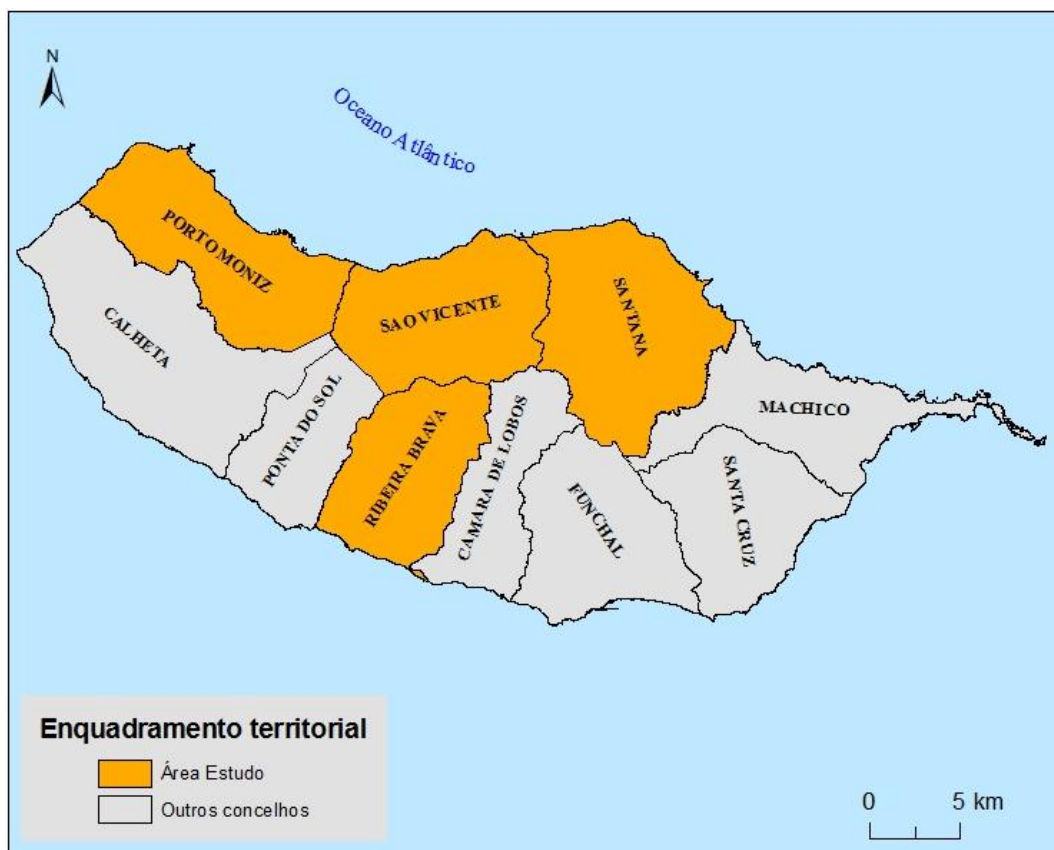


Figura 2 - Enquadramento dos municípios da área de estudo na Ilha da Madeira.

2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA GERAL

2.1. Geologia

De origem vulcânica, a Ilha da Madeira é composta maioritariamente por rochas eruptivas, que constituem o essencial do material aflorante. Todavia, possui outros tipos de materiais na sua composição, o que lhe confere um carácter poligénico do vulcanismo. Assim, podemos encontrar diversos tipos de rocha, com características distintas, como a textura e dureza, em que os mecanismos e os processos actuam de forma diferenciada consoante as suas propriedades físicas e químicas.

Existem também na Ilha formações sedimentares, de fáceis marinhos e fluviais, depósitos coluvionares residuais e alguns depósitos de vertentes, depósitos aluvionares e depósitos de cobertura. As formações sedimentares estão presentes essencialmente nos fundos de vales e no litoral, correspondendo a uma pequena expressão territorial.

A cartografia geológica da Ilha remonta para a publicação da carta geológica à escala 1/50.000, em 1975, pelos Serviços Geológicos de Portugal (Zbyszewski *et al.*, 1974).

Esta carta apresenta um modelo com cinco complexos vulcânicos ($\beta 1$ - $\beta 5$) separados temporalmente desde o Miocénico até o Quaternário. Recentemente foi publicada uma nova carta à escala 1/80.000 (LNEG, 2009), que apresenta uma divisão simplificada em Complexo de Base, Complexos intermédios e Complexos Superiores (Fig. 3).



Figura 3 - Geologia Simplificada da Ilha da Madeira.

Fonte: LNEG, 2009.

Assim, tendo por base esta cartografia simplificada, a Ilha está representada nas três unidades geológicas seguintes:

- Complexo Vulcânico de Base (Miocénico Superior – Pliocénico), constituído largamente por depósitos piroclásticos e brechas vulcânicas, em que escoadas lávicas são secundárias; nalgumas zonas, essencialmente na parte central da Ilha, esta unidade é interrompida por uma densa rede filoniana;
- Complexos Vulcânicos Intermédios (Miocénico – Plio-Plistocénico – Quaternário), formados, essencialmente, por escoadas lávicas basálticas (alcalinas) que sucederam do Pliocénico ao Plistocénico; esta unidade cobre toda a Ilha, com sequências de lavas de mais de 500 metros de espessura, interrompidas pontualmente por filões subverticais;

- Complexo Vulcânico Superior (Quaternário – Pliocénico), que corresponde basicamente a depósitos piroclásticos, cones de escórias e a aparelhos vulcânicos.

2.2. Relevo

A ilha da Madeira tem uma forma alongada de leste para oeste, mas o relevo acidentado dificulta as comunicações entre as costas norte e sul, em geral altas e escarpadas (Fig. 4). A separação entre os sectores norte e sul da Ilha é feita maioritariamente por uma cordilheira central, de orientação NW – SE, a qual inclui os picos mais altos (Pico Ruivo e Pico do Areeiro) e o Planalto do Paul da Serra (Neves *et al.*, 1996).

A orografia da ilha é caracterizada por montanhas, serras e planaltos com altitudes elevadas, com vertentes muito íngremes e abruptos, conferindo um carácter muito acidentado e montanhoso. Segundo Carvalho *et al.* (1991), 31% da sua área tem altitudes superiores a 1000 metros e cerca de 90% acima dos 500 metros, determinando uma altitude média de 650 m e linha costeira constituída por arribas muito íngremes e subverticais.

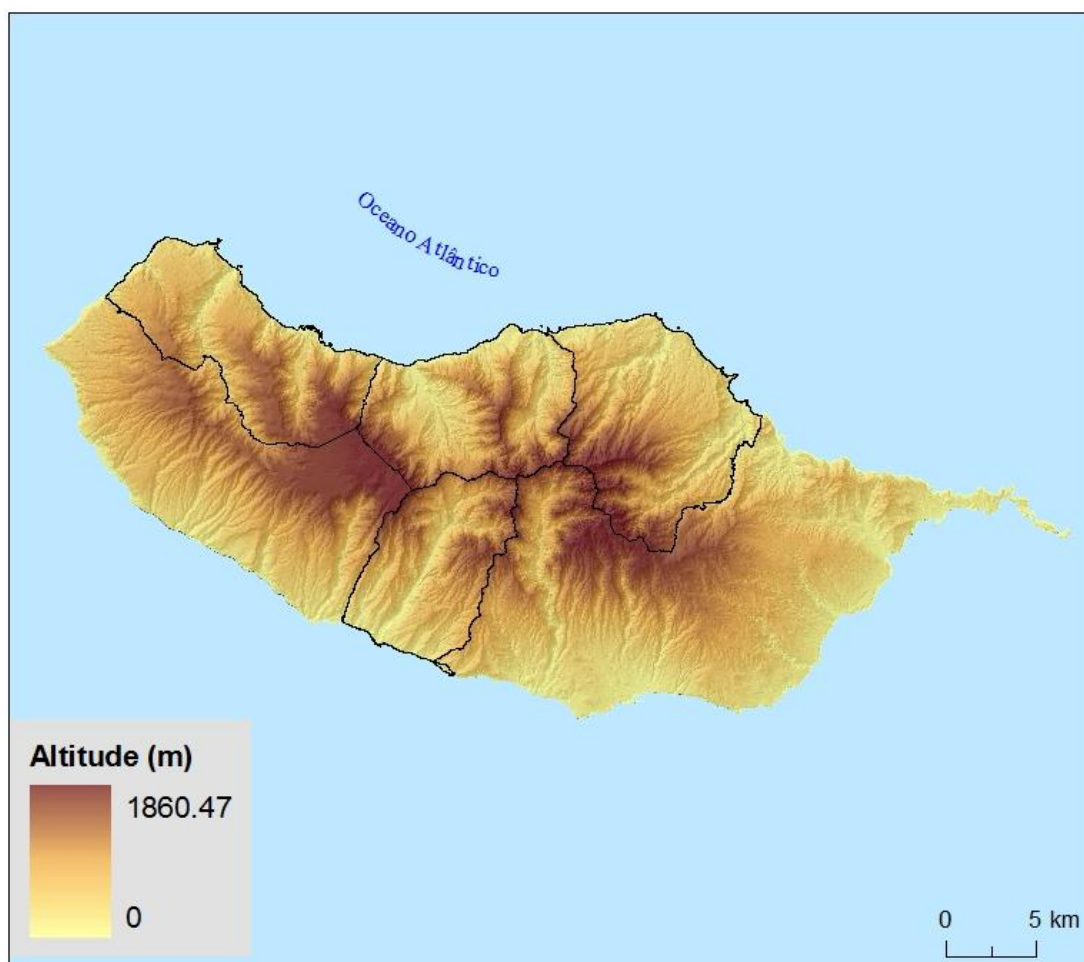


Figura 4 - Altitude da Ilha da Madeira

A ilha da Madeira pode dividir-se em três unidades morfológicas clássicas (Fernandes, 2009): o Maciço Ocidental, o Maciço Central e o Maciço Oriental.

O Maciço Ocidental, a que também se dá o nome de Planalto do Paul da Serra, está separado do Maciço Central pelos vales fundos de São Vicente e Ribeira Brava. É nesta unidade morfológica que se situa o Paul da Serra, um planalto relativamente extenso, situado entre 1300 m e 1500 m de altitude.

O Maciço Central, ou Maciço Vulcânico Central, é a área onde observam as maiores altitudes, com a presença de quatro picos que ultrapassam 1800 m de altitude; o mais alto é o Pico Ruivo com 1862 m, logo seguido pelo Pico das Torres com 1851 m, pelo Pico de Areeiro com 1818 m e pelo Pico Cidrão com 1802 m.

O Maciço Oriental, também denominado Ponta de São Lourenço, integra os pequenos planaltos de Chão da Lagoa e do Santo da Serra.



Figura 5 - Altitude da área de estudo.

A área de estudo está inserida dentro das unidades morfológicas Ocidental e Central onde podemos encontrar os pontos mais elevados da ilha, o Pico Ruivo (Santana),

situado a 1862 m de altitude, e o Planalto do Paul da Serra (Porto Moniz, Ribeira Brava e São Vicente) a cerca de 1500 m de altitude (Fig. 5). A maior proporção da sua área situa-se entre os 400 - 800 metros de altitude, ou seja, 36,7% do total da área em estudo (Quadro 2).

Quadro 2 - Área (km²) e frequência relativa (%) por classe de altitude nos concelhos da área de estudo.

| Altitude (m) | Área (km ²) | Frequência (%) |
|--------------|-------------------------|----------------|
| 0 -200 | 26,6 | 8,2 |
| 200 - 400 | 48,9 | 15,2 |
| 400 - 800 | 118,5 | 36,7 |
| 800 - 1000 | 49 | 15,2 |
| 1000 - 1400 | 62,8 | 19,5 |
| 1400 - 1800 | 16,7 | 5,2 |
| >1800 | 0,046 | 0,0 |
| Total | 322,6 | 100,0 |

2.3. Clima

A localização geográfica do Arquipélago da Madeira e o seu relevo são factores que condicionam as particularidades do seu clima.

Segundo a classificação de Köppen¹, o clima é mesotérmico com chuva e sem quedas regulares de neve, na maior parte da ilha, com Verão pouco quente mas extenso (tipo Csa²) ou, em estreita faixa da costa sul, com Verão quente. Corresponde claramente aos climas de domínio mediterrâneo (Fernandes, 2009). Há uma forte variabilidade da precipitação, característica do próprio clima, e uma distribuição espacial desigual devido a influência do relevo. Porém, há uma forte regularidade térmica, justificada pela sua posição oceânica, a qual funciona como efeito amenizador.

A estação mais fria regista os valores mais elevados de precipitação, podendo ocorrer chuvas muito intensas no Outono, Inverno e Primavera. As chuvas intensas são originadas: (i) pela passagem de perturbações da frente polar, em superfície, acompanhando o fluxo de Oeste ou um ramo meridional deste posicionado numa latitude bastante meridional no Atlântico; (ii) pela presença de depressões associadas a uma circulação de bloqueio em altitude com advecção de ar muito frio na média troposfera (Ferreira, 1982).

¹ Classificação climática global

² Clima temperado com verão seco e quente

A precipitação, quando ocorre com grande intensidade e num curto espaço de tempo, representa elevado risco à ocorrência de movimentos de vertentes, inundações e de cheias rápidas (“aluviões”).

Durante o Verão, a inibição pluviométrica resultante da subsidência anticiclónica que atinge a região, é consequência da subida em latitude da alta pressão subtropical do Atlântico Oriental (Ferreira, 1984), em geral conhecida pela designação de “Anticiclone dos Açores” e explica a forte concentração das chuvas na estação fria e as condições desfavoráveis à ocorrência de precipitação na época mais quente.

No que diz respeito à temperatura e à precipitação verifica-se uma enorme discrepância entre as vertentes norte e sul da Ilha, e ainda entre diferentes altitudes. Na costa Norte, com traços oceânicos, os valores de temperatura são inferiores e as precipitações são superiores do que na vertente sul (Fig. 6), o que se explica pela interposição da barreira orográfica, perpendicular ao avanço dos alísios de Nordeste.

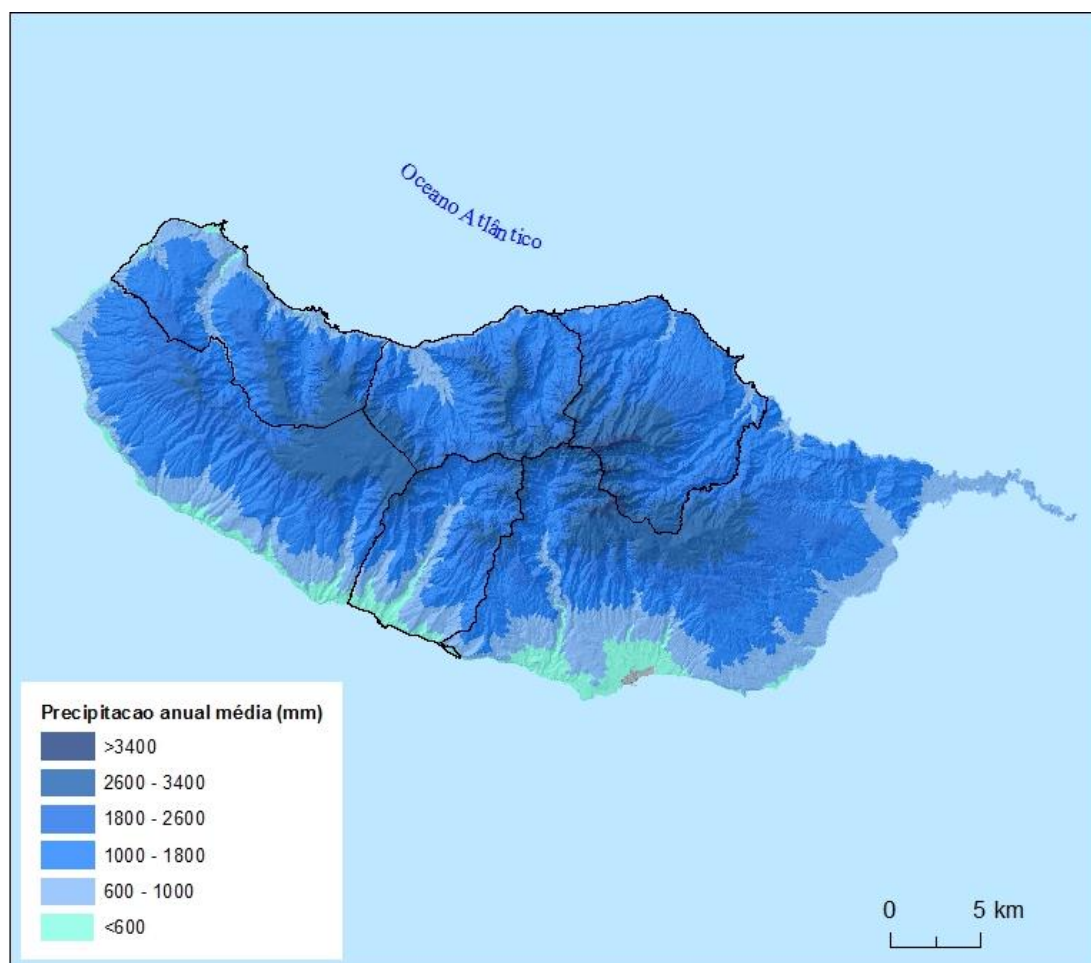


Figura 6 - Distribuição espacial da Precipitação Anual Média (1961-1990) da Ilha da Madeira
(Elaborado pela Município, no âmbito dos PME-PC).

A cordilheira central funciona como barreira à passagem de massas de ar oceânicas de norte e nordeste para a vertente sul. Assim, acima de valores de altitude aproximadamente de 1600 metros, as precipitações são elevadas, ultrapassando 2500 mm nos pontos mais elevados da ilha (Fig. 6).

A encosta sul, mais exposta à radiação solar e abrigada dos ventos húmidos de norte, regista temperaturas mais elevadas, verificando-se o oposto a norte e em altitude (Fig. 7). Como se pode verificar, junto à costa registam-se valores de temperatura médias anuais superiores a 20°C. Com o afastamento à costa e aumento de altitude, os valores de temperatura vão diminuindo, sendo que nos pontos mais altos chega a registar-se valores médios anuais inferiores a 8°C. Verifica-se ainda que as temperaturas médias mais elevadas registam-se próximo da linha de costa e ao longo dos vales.

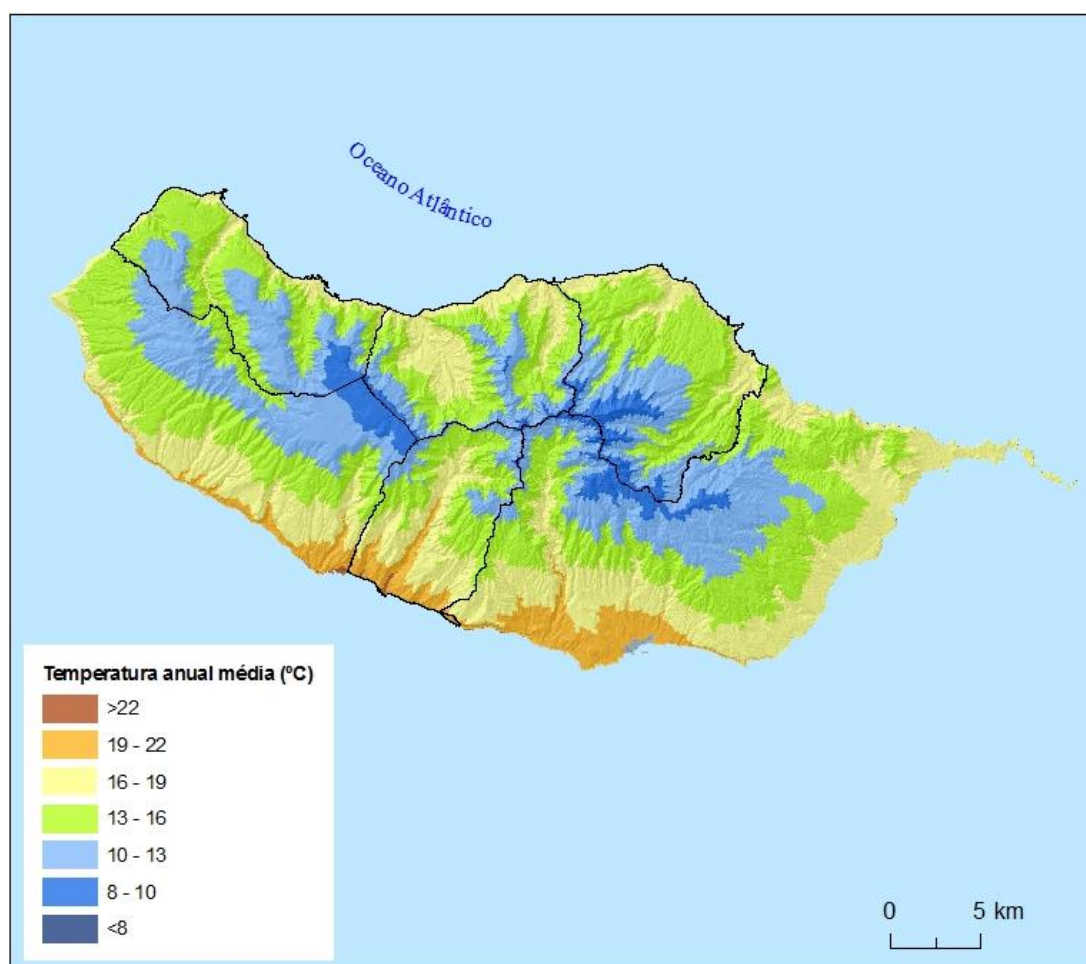


Figura 7 - Distribuição espacial da Temperatura Média Anual (1961-1990) da Ilha da Madeira.
(Elaborado pela Município, no âmbito dos PME-PC).

A área em estudo apresenta as características e diversidades climáticas idênticas ao que se constata em toda Ilha. Através de dados de algumas estações meteorológicas

localizadas na área em estudo e em áreas envolventes, efectuou-se a análise do regime termopluviométrico, com vista a uma breve caracterização climática centrada essencialmente na precipitação, que se afigura como o factor desencadeante dos movimentos de vertente.

Assim, para proceder à caracterização climática do litoral sul, recorreu-se à estação de Lugar de Baixo, localizado no concelho de Ponta do Sol (50m de altitude); para estudar a variação da temperatura e precipitação em altitude, recorreu-se à estação da Bica da Cana (1580 m de altitude) no concelho de São Vicente; e para estudar o litoral norte, recorreu-se à estação de Ponta Delgada (120 m de altitude), no concelho de São Vicente (Fig. 8). Para estas estações analisaram-se os dados do período de 1961 a 1990.

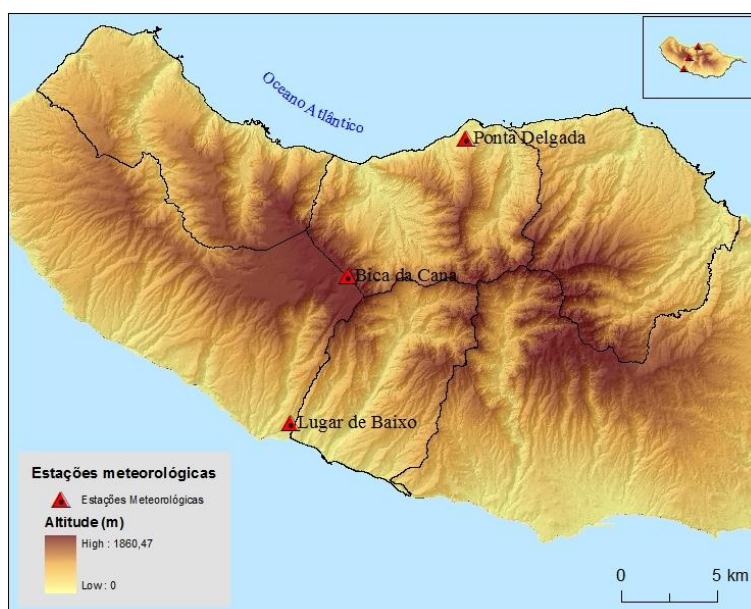


Figura 8 - Localização das Estações Meteorológicas utilizadas.

A análise do gráfico termopluviométrico da estação Bica da Cana, permite-nos aferir que a estação seca é de curta duração e a húmida é de longa duração, características típicas de estações situadas em altitudes elevadas. É nos meses de Outono, Inverno e início da Primavera que se verificam os maiores quantitativos de precipitação, sendo o mês mais chuvoso Janeiro com 450 mm registados. Os meses mais frios são Janeiro e Fevereiro e o mês mais quente é Agosto. A temperatura apresenta uma amplitude térmica de 9,1°C (Fig. 9).

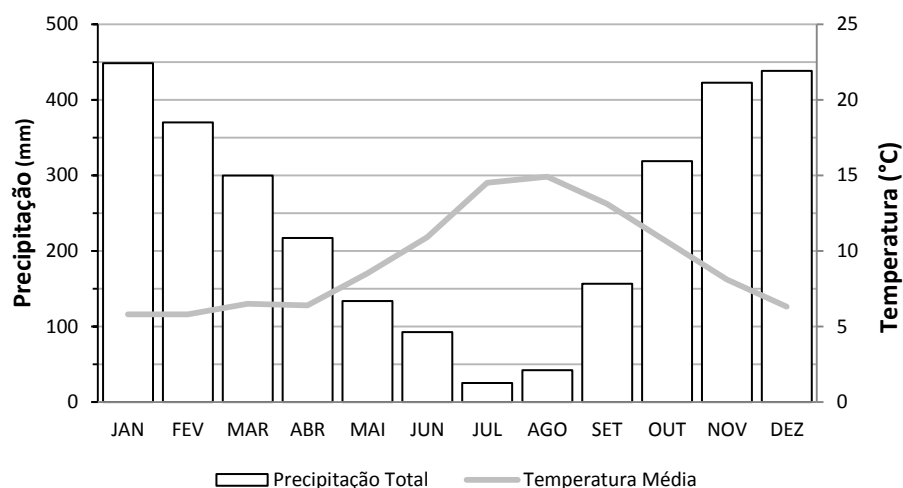


Figura 9 - Regime termopluiométrico da estação meteorológica de Bica da Cana (1961-1990).
Fonte: Normais Climatológicas, IM.

A estação de Lugar de Baixo apresenta níveis de precipitação bastante baixos relativamente à Bica da Cana. Apresenta uma amplitude térmica de 6,3°C e uma estação seca prolongada (Fig. 10). Esta estação apresenta um Verão quente e seco, com cinco meses secos. Em oposição, o Inverno é relativamente chuvoso e suave com temperaturas amenas. A precipitação caracteriza-se por um período de maior ocorrência no Outono e Inverno; o mês mais frio é o Fevereiro com 16,6°C e os meses mais quentes são Agosto e Setembro.

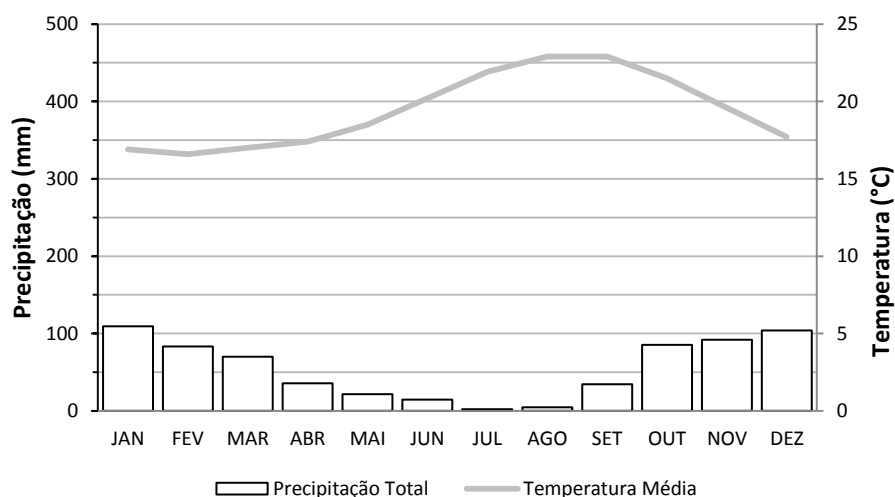


Figura 10 - Regime termopluiométrico da estação de Lugar de Baixo (1961-1990).
Fonte: Normais Climatológicas, IM.

Relativamente à estação de Ponta Delgada, verificamos níveis de precipitação um pouco acima da que ocorre no Lugar de Baixo. No entanto, apresenta uma amplitude térmica igual à de Lugar de Baixo 6,3°C (Fig. 11).

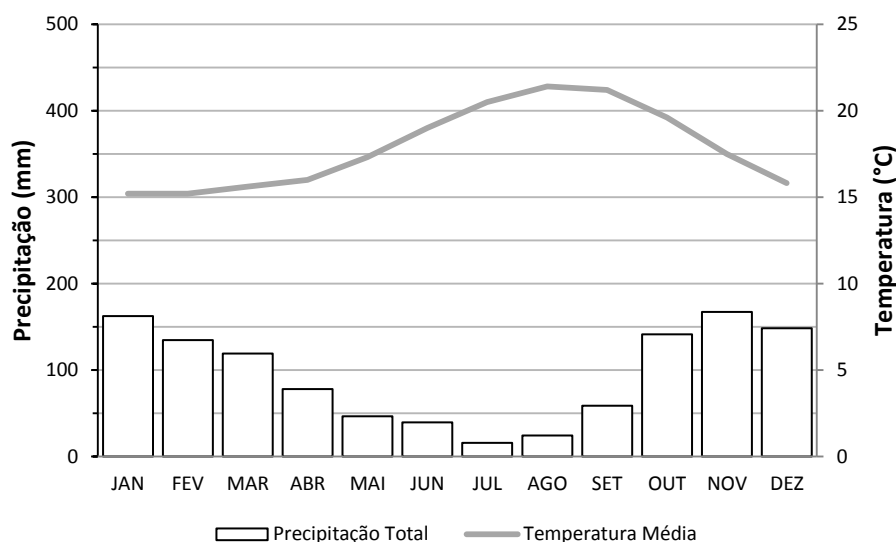


Figura 11 - Regime termopluiométrico da Estação de Ponta Delgada (1961-1990).

Fonte: Normais Climatológicas, IM.

A estação de Ponta Delgada apresenta um Verão também quente e seco, com quatro meses secos. Ao contrário, o Inverno é húmido e suave.

Esta estação apresenta o Outono, Inverno e início da Primavera como meses que registam maiores quantitativos de precipitação, sendo Janeiro o mês mais chuvoso 162,5 mm e também mais fria juntamente com o mês de Fevereiro 15,2°C e o mês mais quente é o Agosto 21,4°C (Fig. 11).

Na generalidade, constatamos que a estação de Lugar de Baixo, o regime médio mostra que o mês mais frio é Fevereiro e o mês mais quente é Agosto. Da mesma forma, verifica-se que, na estação de Bica da Cana, acima dos 1200 m de altitude, e na estação de Ponta Delgada, Janeiro e Fevereiro são os meses mais frios e Agosto mais quente. A estação seca é mais prolongada no litoral sul do que no litoral norte e do que em áreas de altitudes elevadas.

Verifica-se também que a amplitude térmica anual é relativamente baixa, quer no litoral, sul e norte e em altitudes elevadas. A temperatura média do mês mais quente, quer no litoral sul, quer no litoral norte é apenas de 6,3°C. No entanto, a estação de lugar de baixo os valores de temperatura é mais elevados do que a Ponta Delgada e em relação a estação da Bica da Cana, a diferença é maior nos valores da temperatura, quer no Inverno, quer no Verão, onde a influência da altitude é nítida.

A precipitação na área em estudo ao longo do ano, à semelhança da distribuição observada para o conjunto da Ilha, caracteriza-se por apresentar um mínimo no Verão e

um máximo no Outono/Inverno, sendo que a altitude é um factor determinante na quantidade registada nos diferentes postos meteorológicos.

2.4. Hidrografia

A ilha da Madeira possui uma rede de drenagem muito densa, com características de uma rede hidrográfica jovem, que se traduz na reduzida importância da erosão lateral das vertentes e das capturas, bem como em perfis longitudinais com declives acentuados, os quais estão presentes mesmo nas ribeiras com maior grau de maturidade (Ribeiro, 1945 e 1948 *in* Fernandes, 2009). O quadro geral é o de torrentes vigorosas e muito activas nas estações pluviosas, com transporte de abundante carga sólida, heterométrica, e com grande capacidade de transporte até ao mar (Ribeiro, 1985, *in* Silva *et al.* 2010).

A conjugação de precipitações abundantes e a elevada altitude média da ilha da Madeira, à água possui um papel preponderante na modelação do relevo. A morfologia dos cursos de água varia consoante são os materiais sobre os quais se dá o escoamento. Em geral, verifica-se que em formações geológicas muito alteradas, fragmentadas e permeável, menos resistentes, os cursos de água que apresentam perfis em forma de “V”, exibem secções mais abertas e, a rede hidrográfica é mais densa e desenvolvida, e de padrão dendrítico (Nunes, 1998, *in* Silva *et al.*, 2010). Este padrão é característico nos cursos médio e superior de algumas ribeiras. Por outro lado, quando os cursos de água correm sobre as formações litológicas menos permeável, as linhas de água apresentam-se geralmente profundos, muito encaixados e estreitos, com desenvolvimento de paredes sub-verticais a verticais e perfis transversais em forma de “U” (Silva *et al.*, 2010). Este padrão é característico no curso inferior das ribeiras.

A rede hidrográfica da Ilha caracteriza-se por uma certa heterogeneidade na sua distribuição geográfica, pela totalidade dos cursos de água serem do tipo efémero e o seu regime torrencial. Durante o período de Verão os leitos das ribeiras da vertente sul da ilha encontram-se, no geral, secos e repletos de detritos grosseiros, incluindo grandes blocos, que se imobilizam a meio do transporte por perda de competência das águas, até que novas enxurradas possam retomar o seu transporte a caminho do litoral (Prada *et al.*, 2003 *in* Silva *et al.*, 2010).

Segundo Orlando Ribeiro, sobre o regime de águas e o carácter torrencial dos cursos de água da ilha da Madeira, constata que durante os episódios de chuvas excepcionais e

ocasionais, são “frequentemente desastrosas, que enchem as ribeiras, arrastam blocos com algumas centenas de quilos, destroem pontes, danificam casas, inundando a parte baixa das aglomerações situadas à beira-mar e pondo em risco bens e pessoas” (Ribeiro, 1985).

Os cursos de água da área de estudo possuem características idênticas aos da generalidade dos cursos de água da ilha. As ribeiras são relativamente curtas e possuem declives acentuados e são de regime sazonal, os vales são encaixados e profundos e as vertentes são íngremes (Fig. 12).

A rede hidrográfica é bastante densa e bem hierarquizada nas áreas mais elevadas (com maiores declives e menos humanizadas), e à medida que descemos em altitude as densidades de drenagem são mais baixas e a rede menos ramificada, e encontra-se mais influenciada pela acção antrópica.

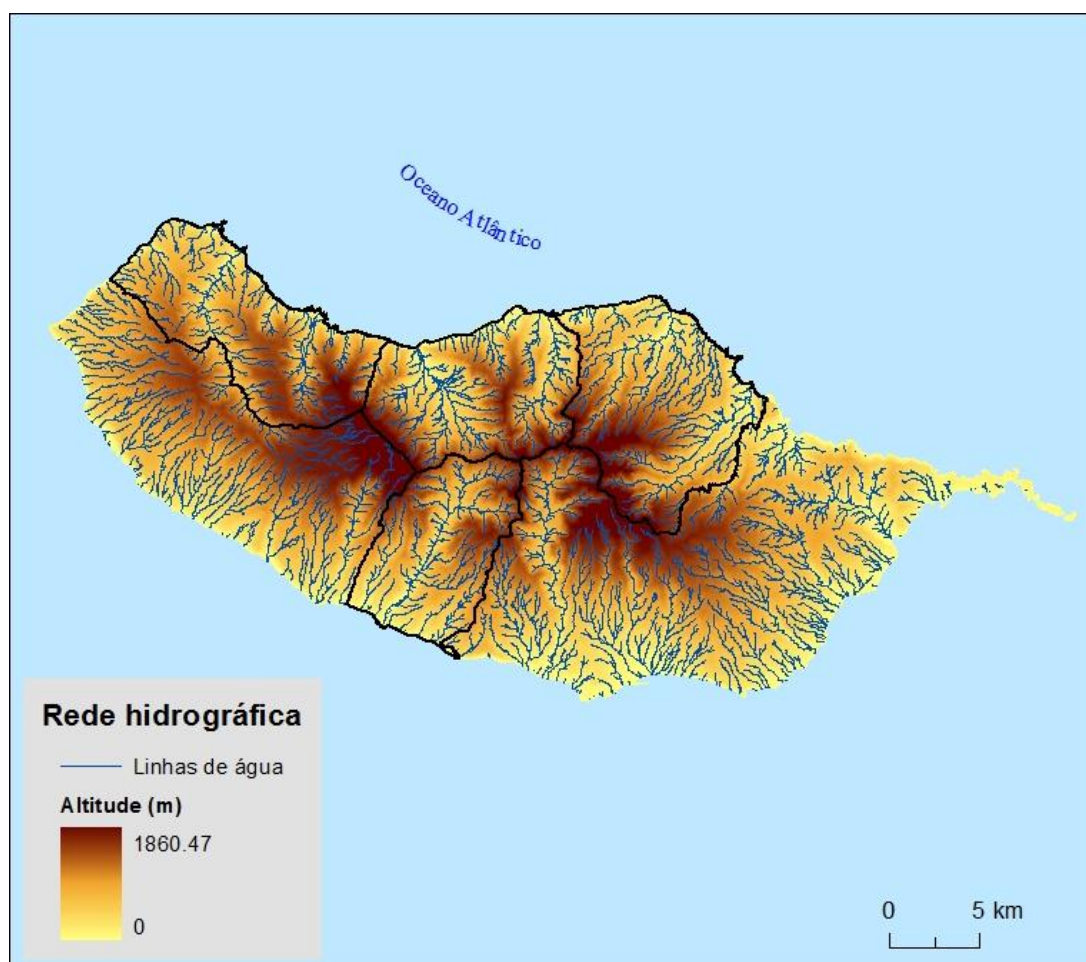


Figura 12 - Rede hidrográfica da Ilha da Madeira
(gerada a partir do respectivo MDT, com base em 2 hectares de área acumulada).

Em suma, os cursos de água possuem grande capacidade de transporte e erosão, as ribeiras possuem declives muito acentuados e as bacias são de pequena dimensão, e o escoamento faz-se quase de forma perpendicular à linha de costa, e a tipologia de drenagem é exorreica.

2.5. Ocupação do Solo

Grande parte da área da ilha da Madeira é de ocupação florestal (Figs. 13 e 14). A floresta regional é caracterizada por um conjunto de comunidades autóctones, que constituem a denominada floresta Laurissilva, e pela presença de espécies florestais introduzidas pelo Homem, que compõem a floresta exótica (Mendes *et al.*, 2006).

A floresta natural situa-se, sobretudo, nas cotas de maior altitude (entre os 300 e os 1300 m) e predominantemente na vertente norte da Ilha onde a temperatura é mais baixa e os teores de humidade são mais elevados. Todavia, pode-se encontrar alguns núcleos deste tipo de coberto vegetal na encosta sul, em locais de difícil acesso, cuja altitude varia entre 700 e 1200 m (Menezes *et al.*, 2004).

A floresta exótica situa-se essencialmente na vertente sul da Ilha da Madeira e nas cotas de menor altitude (entre os 300 e os 700 m) (Quintal, 1985).

Atendendo à Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma da Madeira (COS/RAM), na escala 1:25 000, segundo o Nível 2 de classificação (IGP, 2007), cerca de 44% da área total é ocupada pelas florestas e 33% corresponde as florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea. Estas duas classes representam, assim, 77% da área total da ilha. As restantes áreas são ocupadas por: áreas agrícolas heterogéneas (9%); Tecido Urbano (6%); culturas permanentes (3%); indústria, comércio e transportes (3%); zonas descobertas e com pouca vegetação (1%); Áreas de extracção de Inertes, Deposição de resíduos e de Estaleiros (0,18%); Corpos de Água (0,46%); Espaços Verdes Urbanos, Equipamentos Desportivos, Culturais e de Lazer e Zonas Históricas (0,48%); Pastagens Permanentes (0,24%); Zonas Húmidas (0,10%) (Fig. 13).

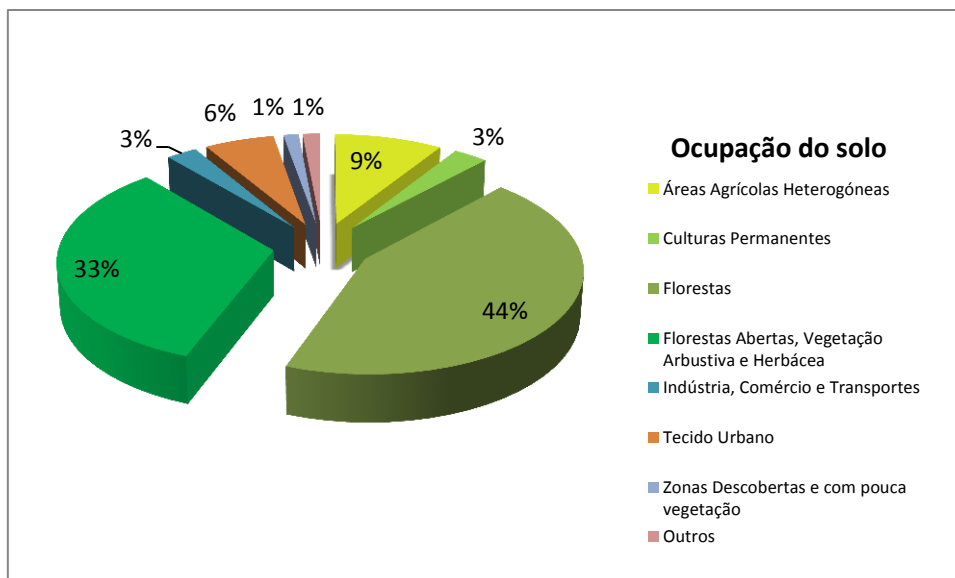


Figura 13 - Frequência relativa das classes de ocupação do solo na ilha da Madeira.

Fonte: COS/RAM, na escala 1:25 000, Nível 2 de classificação (IGP, 2007).

As altitudes elevadas e os declives acentuados influenciam o modo como se dá a ocupação do solo na ilha da Madeira. Segundo a COS/RAM 2007, as áreas classificadas de “tecido urbano” ocupam uma área correspondente a 6% do território (Fig. 13). Sendo assim, grande parte das aglomerações urbanas localizam-se nas áreas mais baixas e planas junto ao litoral, ao longo de alguns fundos de vales e em altitudes intermédias, baixando o grau de ocupação a medida que aumenta a altitude.

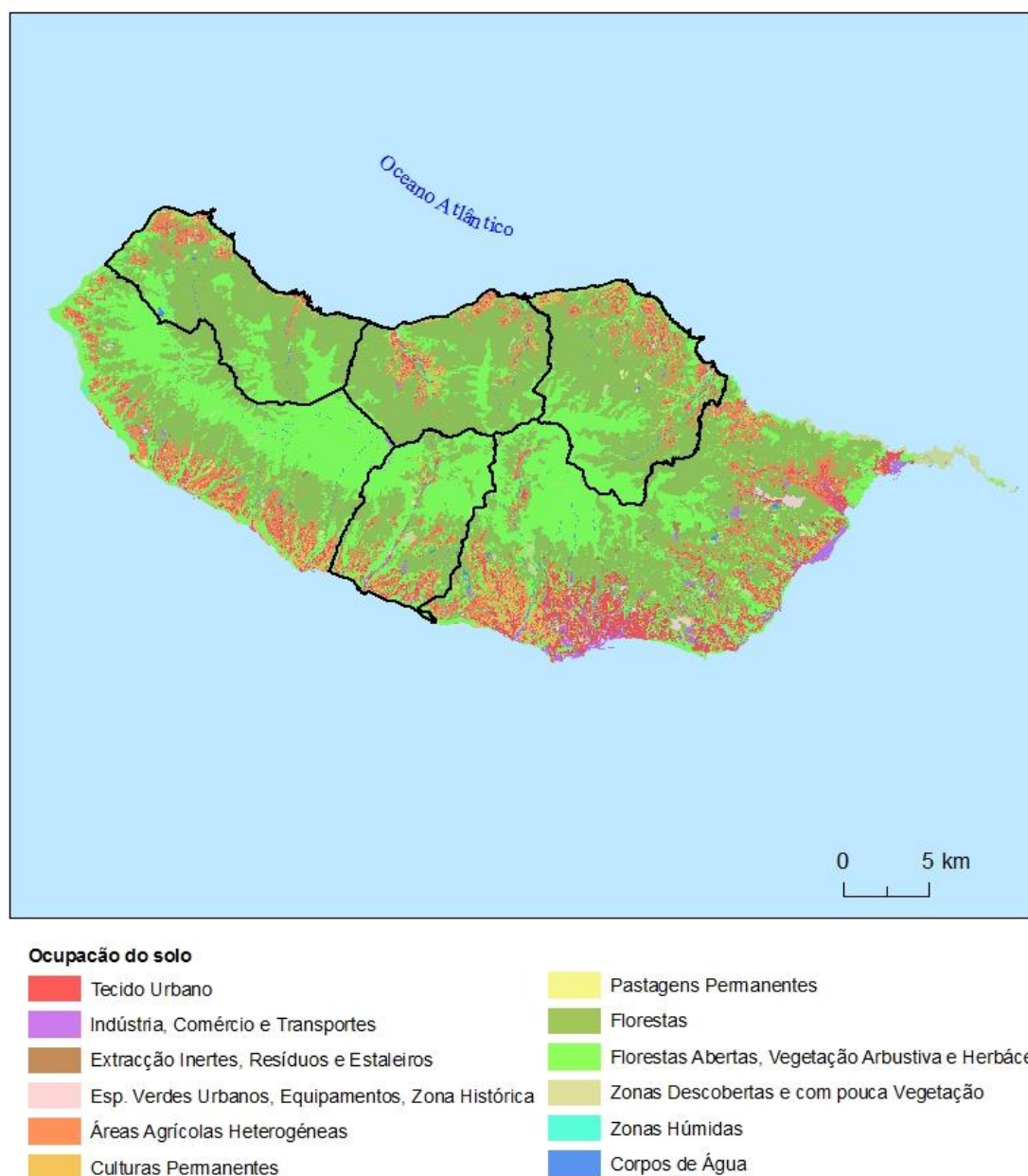


Figura 14 - Ocupação do Solo na Ilha da Madeira.

Fonte: COS/RAM, segundo o Nível2 (IGP, 2007).

CAPÍTULO II – INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

1. A AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS

O processo de criação de base de dados foi largamente desenvolvido no *software* SIG ArcGIS 9.3, em estrutura vectorial, exceptuando-se os dados altimétricos. Após os procedimentos de digitalização, georreferenciação, vectorização e edição, todos os dados espaciais foram convertidos para estrutura *raster*, de forma a poder realizar as diversas etapas da modelação no ambiente ArcGIS 9.3. A resolução utilizada é de 5 m (células com 25 m²), considerada adequada às características da informação de base e aos objectivos em vista.

Refira-se ainda que todos os mapas utilizados neste trabalho, desde a cartografia de base até à utilizada nos processos de modelação se encontram no sistema de referenciação seguinte: projecção Universal Transversa de Mercator (UTM) e respectivo sistema de coordenadas (Zona 28N), elipsóide Internacional e *datum* de Porto Santo (1936).

A aquisição e construção da base de dados cartográfica, que abarca toda informação de base e os vários mapas utilizados na avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, baseiam-se essencialmente nas seguintes tarefas: digitalização, vectorização e edição da informação cartográfica original pré-existente (em formato analógico e digital); e na cartografia dos deslizamentos através da fotointerpretação de fotografia aérea de grande resolução (*pixel* = 0,4m).

O Quadro 3 sintetiza toda a informação de base bem como os mapas derivados.

Quadro 3 - Síntese da Informação de Base.

| Informação de base | Produtor | Escala ou resolução original | Temas criados |
|--|----------------------|------------------------------|---|
| Cartografia Topográfica da Ilha da Madeira | DRCC | 1/5000 | Altitude, Declives, Exposição e Curvatura das vertentes |
| Carta Geológica da Ilha da Madeira | SRARN | 1/50000 | Tipos litológicos |
| Ortofotos, folhas 1 - 100 (6/7/2007 e 8/7/2010) | Município, E.M, S.A. | 0,4 m | Deslizamentos |
| Carta de Ocupação do Solo (COS2007) | IGP | 1/25000 | Classes de Ocupação do Solo |
| Carta dos Solos da Madeira | DRA | 1/50000 | Tipos de Solos (grupos) |

Assim, é a partir da informação de base que serão construídos os demais temas cartográficos, que posteriormente serão integrados no processo de modelação com vista a obtenção das áreas de susceptibilidade à ocorrência dos deslizamentos.

2. PROCESSO DE CRIAÇÃO DA CARTOGRAFIA DOS DESLIZAMENTOS (VARIÁVEL DEPENDENTE)

2.1. Inventariação dos Deslizamentos

O processo inventariação dos deslizamentos seguiu uma sequência de trabalho que passou pela sua identificação, delimitação (vectorização) e selecção. Através de uma sistematização de tarefas e de uma metodologia de trabalho consistente, o processo seguiu as seguintes etapas:

- 1.º Selecção dos ortofotos (2007 e 2010) da área de estudo;
- 2.º Criação de um tema com uma quadrícula quilométrica, de forma a permitir uma compartimentação da área e uma sistematização do processo de levantamento e cartografia dos polígonos;
- 3.º Introdução dos temas de suporte, que servem de apoio à identificação dos movimentos de vertente: curvas de nível (equidistância de 5m) e linhas de água; as primeiras serviram para obter as cotas e identificar o topo e a base da vertente, bem como a inclinação, desnível e a direcção do fluxo, com intuito de auxiliar na identificação das cicatrizes dos deslizamentos; as linhas de água serviram basicamente para facilitar a localização dos talwegues;
- 4.º Por fim, através da utilização conjunta dos ortofotos e dos temas de apoio (referidos no ponto anterior), procedeu-se à vectorização dos polígonos de todos os deslizamentos identificados;
- 5.º Selecção dos deslizamentos considerados “verdadeiros”, com vista à sua utilização nos processos de avaliação de susceptibilidade.

A inventariação e cartografia dos deslizamentos foram tarefas árduas, complexas e morosas, mas de importância capital, visto que indica a distribuição espacial e a dimensão dos movimentos ocorridos, sem a qual o recurso a métodos indirectos de avaliação seria impossível.

A última etapa do processo de cartografia dos deslizamentos indica que nem todos os deslizamentos identificados na etapa 4 foram utilizados. De facto, na fase de identificação e delimitação, os deslizamentos foram classificados em três categorias: “possíveis”, “prováveis” e “certos”. Na impossibilidade de efectuar trabalho de campo, que permitiria validar todos os deslizamentos, foram utilizados apenas os classificados como “certos”, os quais se encontram apoiados por um conjunto de evidências que não suscitam, à partida, quaisquer dúvidas acerca da sua existência.

Neste sentido, para além das evidências verificadas nos ortofotos de 2010 que foram utilizados como base para este levantamento, foi de grande importância a utilização simultânea dos ortofotos de 2007 visto que a maior parte das ocorrências facilmente identificadas são posteriores a este ano.

É importante referir que, para além das dificuldades normais de identificação e delimitação, outros factores contribuíram para limitar a qualidade e a quantidade do processo de levantamento de deslizamentos:

- Nos ortofotos de 2007 e 2010 existem áreas com cobertura de nuvens e, principalmente, áreas de sombra de dimensão considerável, associadas a algumas vertentes de grandes dimensões, onde não foi possível identificar qualquer ocorrência de movimentos; assim nestas áreas não foi marcado qualquer deslizamento, o que não implica a sua inexistência;

- Na área de estudo, constatou-se que uma parte importante dos deslizamentos ocorridos tinham continuidade, para jusante, em escoadas, pelo que nem sempre foi fácil e evidente identificar o limite onde termina o deslizamento e se inicia a escoada; nestes casos de dúvida optou-se por marcar o limite inferior do deslizamento por defeito, situação que foi considerada preferível à inclusão, na área destes deslizamentos, de parte do sector montante da escoada.

Refira-se ainda, em relação a esta última situação, que a marcação do limite inferior dos deslizamentos, em condições de maior incerteza, obedeceu a um critério de continuidade das propriedades dos factores condicionantes, de forma a não introduzir ambiguidade no processo de modelação. Quer isto dizer que, nestes casos, para cada deslizamento, tentou-se manter a uniformidade de condições, especialmente de declive e litologia, mas também dos restantes factores.

Como foi referido, os movimentos de vertentes na área de estudo foram inventariados com recurso exclusivamente à interpretação de fotografia aérea de grande resolução (0,4 m), ortorectificada, com datas relativamente próximas (2007 e 2010), com sobreposição das curvas de nível com equidistância de 5 m e dos cursos de água; todos os movimentos foram desenhados nos ortofotos de 2010, considerada a data de referência, sendo que os ortofotos de 2007 serviram basicamente para efeitos de comparação. Os indícios tidos em conta para o efeito de identificação dos deslizamentos foram:

- a) Cicatriz com aspecto mais ou menos fresco, por isso mais evidente;
- b) Interrupção abrupta da vegetação, essencialmente em áreas de vegetação densa;
- c) Diferença de coloração dos materiais movidos, indicando possível deslocação de material (ver figuras no Anexo).

3. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

3.1. O Modelo Digital do Terreno e as Variáveis Derivadas

Na primeira fase foi construído o Modelo Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Numérico de Elevação (MNE) com base na cartografia topográfica da Ilha da Madeira à escala 1: 5000, da Direcção Regional de Cartografia e Cadastro da Madeira (DRCC, 2007). Desta carta obteve-se informação linear e pontual, curvas de nível (com equidistância de 5 m) e pontos cotados, respectivamente, tendo em vista a criação de uma rede irregular de triângulos (TIN – Triangular Irregular Network). O modelo TIN é o “mais utilizado para modelação de superfícies contínuas em estruturas de dados vectoriais. Entre diversas vantagens, destaca-se uma maior facilidade de representação de superfícies complexas e uma maior adequação para a representação tridimensional do relevo. Além disso, podem ser utilizados para gerar modelos numéricos em estrutura matricial, particularmente adequados para análise e modelação do terreno” (Reis, 2006: 104).

O Modelo Numérico de Elevação (MNE) assume um papel importante nos estudos de Geografia Física, em particular, nos estudos dos vários processos geomorfológicos que ocorrem nas vertentes. Através dele, obtêm-se factores determinantes para a explicação dos mesmos, nomeadamente altitude, exposição das vertentes e características

geomorfológicas, traduzidas através de declives, extensão e formas das vertentes (Reis, 2006).

As variáveis “Declives” (Fig. 15 e Quadro 4) e “Exposições das Vertentes” (Fig. 16 e Quadro 4) foram, assim, obtidas através do MNE. O mapa de “declives” foi submetido a uma classificação em 9 classes. Por sua vez, as “Exposições das Vertentes” foi classificada em 8 principais direcções (octantes), tendo em consideração também as áreas planas.

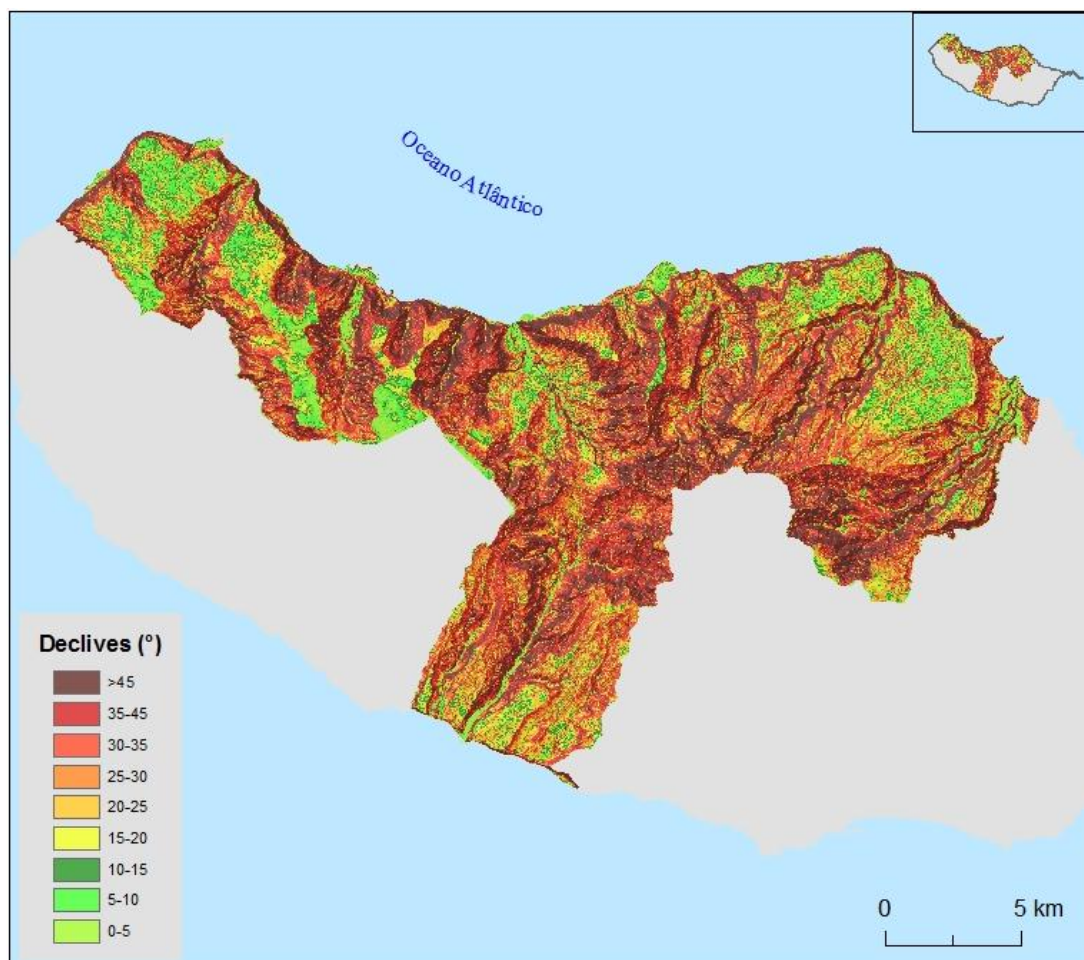


Figura 15- Distribuição do declive (em graus) nos concelhos da área de estudo.

A área em estudo globalmente possui declives muito acentuados, sendo que mais de 57% da sua área total cerca de 18381,9 ha tem declives acima de 30° e as áreas com declives mais baixos, abaixo de 5° ocupam apenas 3,4% da área de estudo o equivalente a 1096,2 ha (Quadro 4).

As áreas mais declivosas situam-se nas vertentes das altas montanhas e nas arribas da costa norte e noroeste da área de estudo; grande parte destas áreas possui declives elevados superior a 35°. As áreas com declives mais baixos localizam-se basicamente

nos planaltos e no fundo de alguns vales, sendo que o sector norte da área de estudo possui mais áreas com declives abaixo de 10° do sector sul (Fig. 15).

Em geral, o sector norte é o que possui mais áreas declivosas e ao mesmo tempo onde se encontram lugares com declives mais baixos do que o sector sul da área de estudo.

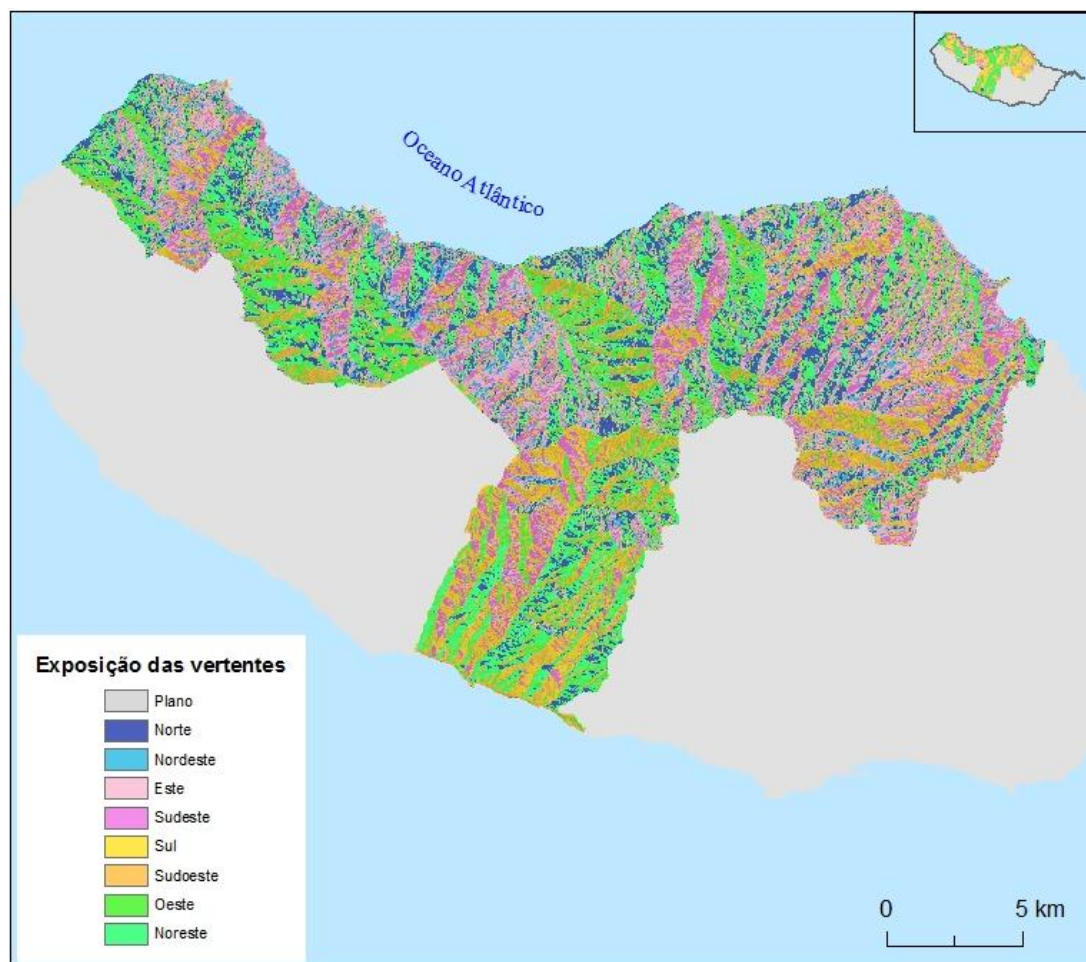


Figura 16 - Exposições das vertentes nos concelhos da área de estudo.

Na área em estudo verifica-se uma predominância das vertentes expostas a norte, que ocupam uma área de 7887,5 ha, que corresponde a 24,5% do território em análise. Ocupando áreas significativas surgem as vertentes expostas ao noroeste, cerca de 4579,7 ha, a leste ocupa 4468,1 ha, e a sudeste ocupa 3913,1 ha, respectivamente 14,2, 13,9 e 12,1% da área total. Nota-se que as áreas de terreno plano apenas ocupam 98,7 ha correspondendo a 0,3 % do total do território. Observa-se que as vertentes orientadas a nordeste e sudoeste ocupam proporção de área similar, sendo que o primeiro ocupa 2499,2 ha de área e o segundo 2557,4 ha, correspondendo, 7,7% e 7,9% respectivamente. Com proporções de áreas semelhantes, estão as vertentes expostas a sul

e oeste, com 3045,7 ha e 3209,1 ha, equivalendo a 9,4 e 9,9%, respectivamente (Quadro 4).

Nota-se que as vertentes expostas a leste e sudeste distribuem-se por toda a área de estudo. Por outro lado, verifica-se que as vertentes orientadas a oeste e noroeste distribuem-se pelos sectores central, centro-norte e noroeste da área de estudo (Fig. 16).

A carta “perfil transversal das vertentes” (Fig. 17 e Quadro 4) foi obtida através do MNE a partir da extensão ArcSIE para ArcGIS 9.3; procedeu-se à sua modelação com a resolução espacial de 5 metros de lado e foi submetido a uma classificação nas 3 seguintes classes: Convexo, Rectilínea e Côncava.

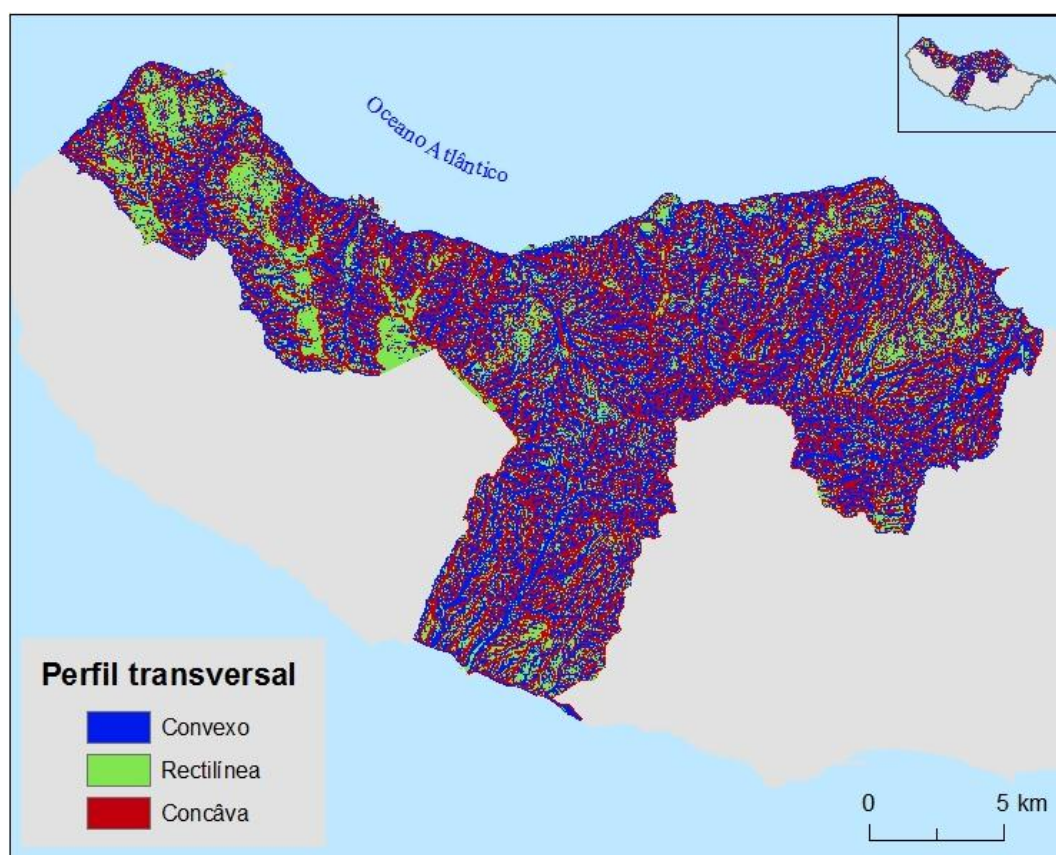


Figura 17 - Perfis Transversais das vertentes nos concelhos da área de estudo.

(Elaborado pela Municípiã, no âmbito dos PME-PC).

Verifica-se que as vertentes com perfis com formas convexas e côncavas se distribuem por toda a área de estudo, enquanto as vertentes com perfil rectilíneas surgem apenas em algumas áreas planas nos planaltos e ocorrem com mais frequência nos sectores norte, nordeste e noroeste (Fig. 17).

As vertentes com perfil transversal convexo ocupam a maior área 12985,6 ha (40,3%) do total da área em estudo. Ocupando uma área relativamente inferior do que as formas de vertente convexa, as vertentes côncavas ocupam 12547,9 ha (38,9%) do território. Com menor expressão territorial são as formas de vertentes rectilíneas que ocupam 6724,9 ha (20,8%) da área total (Quadro 4).

Quadro 4 - Área (ha) e frequência relativa (%) dos declives (°) nos concelhos da área de estudo.

| VARIÁVEIS | CÓDIGO | CLASSES | Área (há) | Frequência Relativa (%) |
|----------------------------------|--------|---------------|-----------|-------------------------|
| DECLIVES (graus) | D1 | 0 – 5 | 1096,2 | 3,4 |
| | D2 | 5 – 10 | 1925,5 | 6,0 |
| | D3 | 10 – 15 | 2380,9 | 7,4 |
| | D4 | 15 – 20 | 2600,6 | 8,1 |
| | D5 | 20 – 25 | 2706,7 | 8,4 |
| | D6 | 25 – 30 | 3166,5 | 9,8 |
| | D7 | 30 – 35 | 3985,4 | 12,4 |
| | D8 | 35 - 45 | 7451,8 | 23,1 |
| | D9 | >45 | 6944,7 | 21,5 |
| EXPOSIÇÕES DAS VERTENTES | EV1 | Terreno Plano | 98,7 | 0,3 |
| | EV2 | N | 7887,5 | 24,5 |
| | EV3 | NE | 2499,2 | 7,7 |
| | EV4 | E | 4468,1 | 13,9 |
| | EV5 | SE | 3913,1 | 12,1 |
| | EV6 | S | 3045,7 | 9,4 |
| | EV7 | SW | 2557,4 | 7,9 |
| | EV8 | W | 3209,1 | 9,9 |
| | EV9 | NW | 4579,7 | 14,2 |
| PERFIL TRANSVERSAL DAS VERTENTES | PTV1 | Convexo | 12985,6 | 40,3 |
| | PTV2 | Rectilíneo | 6724,9 | 20,8 |
| | PTV3 | Côncavo | 12547,9 | 38,9 |

3.2. Processamento das Variáveis Qualitativas

As variáveis Solos (grupos) e Unidades Litológicas foram criadas a partir da Carta de Solos da Ilha da Madeira e da Carta Geológica da Ilha da Madeira, respectivamente; por sua vez, a Ocupação do Solo foi obtida através da Carta de Ocupação do Solo da Ilha da Madeira (COS2007) para a área de estudo. Com recurso ao *ArcCatalog 9.3* do *software* SIG ArcGIS 9.3 foram criados dois temas vectoriais com formato *Shapefile*, do tipo polígono. Posteriormente foram importados para o *software ArcMap 9.3*, onde passaram por processo de georreferenciação, e a partir daí iniciou-se a vectorização sobre as

imagens das cartas supra mencionadas para delimitação das diversas classes que compõem os mapas.

Assim, o tema “litologia” (Fig. 18 e Quadro 5) foi obtido através da Carta Geológica da Ilha da Madeira na escala 1:50 000 e foi reclassificada em 18 classes das 23 iniciais, porque algumas delas possuem composição e características similares (Quadro 5).

Quadro 5 - Generalizações das classes de unidades litológicas nos concelhos da área de estudo.
Fonte: Carta Geológica da Ilha da Madeira, folhas A e B (SRARN, 2010).

| Código | Descrição das classes originais | Descrição das classes agrupadas |
|--------------|---|---|
| a | Aluviões | |
| cap | Cascalheiras e areias de praias | |
| la | Depósitos de <i>lahar</i> constituídos por fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e fluxos de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos | Depósitos de fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa |
| dm | Depósitos de movimentos de massa, do tipo avalanche de detritos associados a deslizamentos e desabamentos; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fracturada | Depósitos de movimentos de massa; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fracturada |
| dv | Depósitos de vertente e coluviões | |
| CVS2 pihT | Depósitos piroclásticos hidroplinianos traquíticos (tufos de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos hidromagmáticos máficos, piroclastos subaéreos de queda e níveis de tufito | Depósitos piroclásticos traquíticos (tufos de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos máficos, piroclastos e níveis de tufito |
| CVS1 pid | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e <i>lapilli</i> de queda, geralmente alterados | Depósitos piroclásticos máficos: cinzas e <i>lapilli</i> |
| CVS2 pid | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos distais: cinzas e <i>lapilli</i> de queda, geralmente alterados | |
| CVM2 pi | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais e ocasionais produtos freatomagmáticos | Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> , piroclastos |
| CVM3 pi | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> de cones estrombolianos/havaianos, piroclastos de queda distais, ocasionais produtos de actividade freato-magmática e níveis de tufos de cinzas traquíticas | |

| | | |
|-------------|---|--|
| CVS1 pic | Depósitos piroclásticos máficos subaéreos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas de cones estrombolianos/havaianos | Depósitos piroclásticos máficos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas |
| CVS2 pic | | |
| CVM2 g | Depósitos sedimentares de fácies brechóides, conglomeráticas e areníticas grosseiras, associados a fluxos detríticos ou fluxos de lama (lahares) e ocasionais depósitos de avalanche de detritos relacionados com deslizamentos | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama |
| CVS1 g | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas e areníticas, associados a fluxos de detritos ou a fluxos de lama (lahares) e fluxos canalizados hiperconcentrados | |
| CVM3 g | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama (lahares) e fluxos hiperconcentrados | |
| CVS2 g | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama (lahares) e fluxos hiperconcentrados canalizados | |
| CVI 2 | Depósitos sedimentares marinhos de baixa profundidade (fácies nerítica e recifal):conglomerados e micro-conglomerados matriz carbonatada, calcários e calcarenitos, fossilíferos | Depósitos sedimentares marinhos: conglomerados e micro-conglomerados, calcários e calcarenitos |
| CVM3 B | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos) com intercalações de depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas), níveis de tufitos e ocasionais produtos máficos de actividade freato-magmática | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos e de depósitos piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) |
| CVS1 B | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos, depósitos piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e ocasionais produtos máficos de actividade freato-magmática | |
| CVM2 B | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações ocasionais de tufos basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas) e produtos de actividade freato-magmática) | Derrames lávicos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações de tufos basálticos (escórias, <i>lapillie</i> cinzas) |
| CVS2 b | Derrames lávicos subaéreos de composição máfica (basaltos), com intercalações ocasionais de piroclásticos de queda (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) e produtos de actividade freato-magmática | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos), com intercalações de piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) |
| CVS2 B | | |
| CVM1 B | Produtos vulcânicos subaéreos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados; intercalações sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas | |
| CVI 1 | Rochas máficas muito alteradas, palagonitizadas, de | Rochas máficas muito alteradas: |

| | | |
|---------|---|--|
| | possível origem submarina e hidromagmática (hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos) | hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos |
| t | Traquitos | |
| CVS 1-2 | Unidades dos Lombos e do Funchal indiferenciados | |

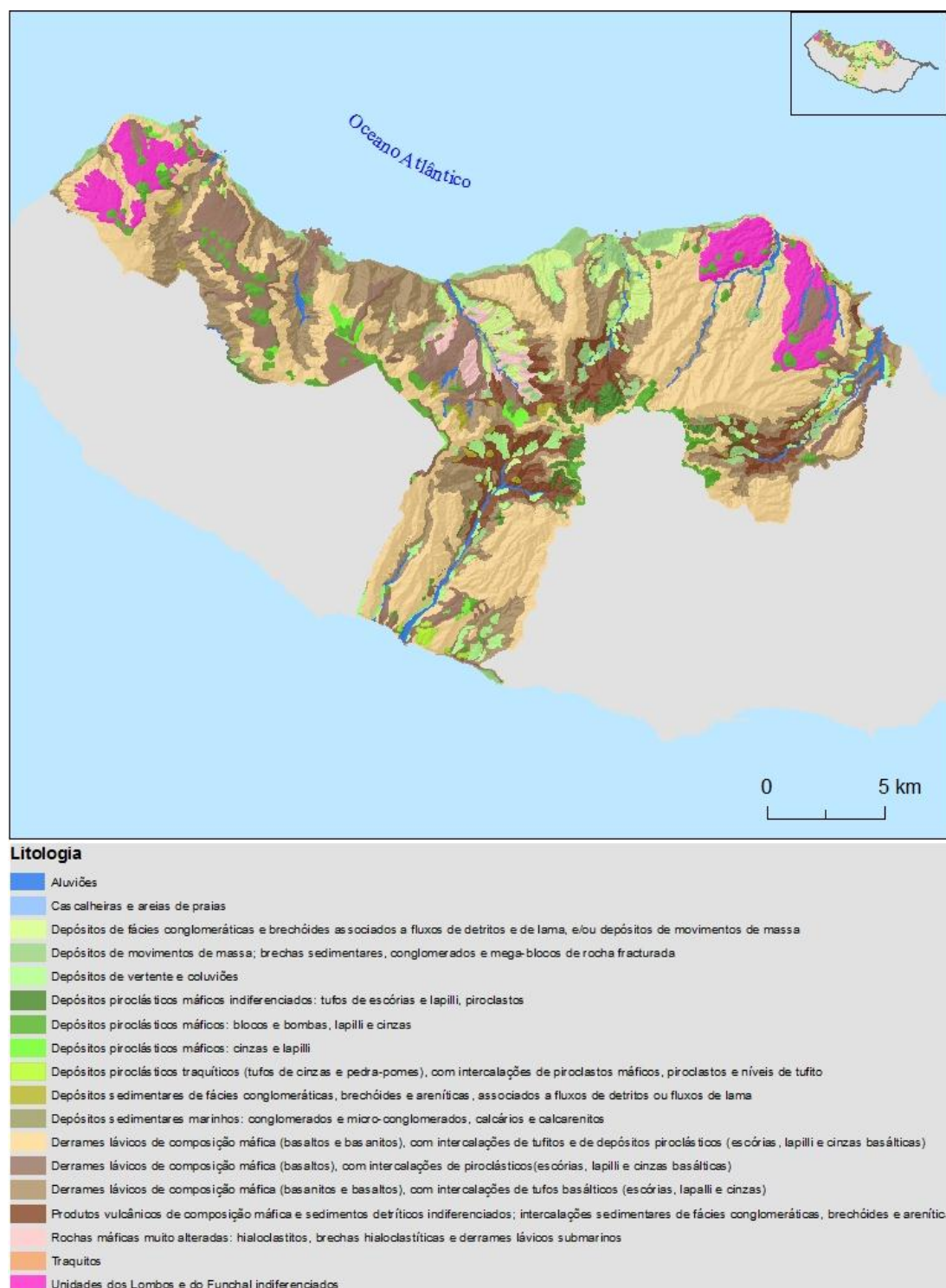


Figura 18 - Unidades Litológicas (reclassificadas) nos concelhos da área de estudo.

Fonte: Carta Geológica da Ilha da Madeira, folhas A e B (SRARN, 2010).

Do ponto de vista litológico, baseado na Carta Geológica da Ilha da Madeira, (SRARN, 2010), (Fig. 18 e Quadro 6), a área em estudo é composta maioritariamente por “Derrames Lávicos de composição máfica” que ocupam 21717,1 ha correspondendo 67,2% da área total. Estes materiais distribuem-se espacialmente por todo o território em estudo. Os “Produtos vulcânicos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados; intercalações sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas” ocupam uma área de 2269,3 ha (7,0%), e ocorrem basicamente no sector interior central da área de estudo. Ocupando uma área assinalável, as “Unidades dos Lombos e do Funchal indiferenciados” ocupa 2012,0 ha (6,2%), localizam-se nas vertentes nordeste e noroeste da área de estudo. As outras formações de natureza basáltica, que estão presentes em menor expressão territorial e com alguma importância, são os “Depósitos piroclásticos máficos”, que, em conjunto, ocupam cerca de 6% do território. Ainda, outras das formações com algum destaque, são as de natureza predominantemente sedimentar, confinadas essencialmente aos fundos de vales e à faixa costeira, com uma expressão territorial peculiar, mas que representam cerca de 11%, e as rochas máficas muito alteradas, que correspondem apenas a 2% do território em análise.

Quadro 6 – Área (ha) e frequência relativa (F_i) das unidades litológicas (reclassificadas) presentes nos concelhos da área de estudo.

Fonte: Carta Geológica da Ilha da Madeira, folhas A e B, (SRARN, 2010).

| Código | Classes | Área (ha) | Fi (%) |
|--------|--|-----------|--------|
| UL1 | Aluviões | 829,3 | 2,6 |
| UL2 | Cascalheiras e areias de praias | 2,0 | 0,0 |
| UL3 | Depósitos de fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa | 748,3 | 2,3 |
| UL4 | Depósitos de movimentos de massa; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fracturada | 1013,8 | 3,1 |
| UL5 | Depósitos de vertente e coluviões | 749,9 | 2,3 |
| UL6 | Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados: tufos de escórias e <i>lapilli</i> , piroclastos | 598,9 | 1,9 |
| UL7 | Depósitos piroclásticos máficos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas | 1104,3 | 3,4 |
| UL8 | Depósitos piroclásticos máficos: cinzas e <i>lapilli</i> | 243,6 | 0,8 |
| UL9 | Depósitos piroclásticos traquíticos (tufos de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos máficos, piroclastos e níveis de tufito | 68,1 | 0,2 |
| UL10 | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama | 232,6 | 0,7 |
| UL11 | Depósitos sedimentares marinhos: conglomerados e micro-conglomerados, calcários e calcarenitos | 2,0 | 0,0 |
| UL12 | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos e de depósitos piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) | 11970,1 | 37,1 |
| UL13 | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos), com intercalações de piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) | 2853,2 | 8,8 |
| UL14 | Derrames lávicos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações de tufos basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas) | 6893,8 | 21,4 |
| UL15 | Produtos vulcânicos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados; intercalações sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas | 2269,3 | 7,0 |
| UL16 | Rochas máficas muito alteradas: hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos | 657,6 | 2,0 |
| UL17 | Traquitos | 7,1 | 0,0 |
| UL18 | Unidades dos Lombos e do Funchal indiferenciados | 2012,0 | 6,2 |

O mapa de tema “solos” (Fig. 19 e Quadro 7) foi obtida através Carta de Solos da Ilha da Madeira na escala 1:50 000, que segue a classificação estabelecida pela

FAO/UNESCO, em que além das 8 classes identificadas na área de estudo, se introduziu a classe que representa as áreas urbanas ("Urbano"). As áreas ocupadas por esta classe não estavam identificadas na carta de solos, pelo que foi necessário obtê-las a partir da Carta de Ocupação do Solo.

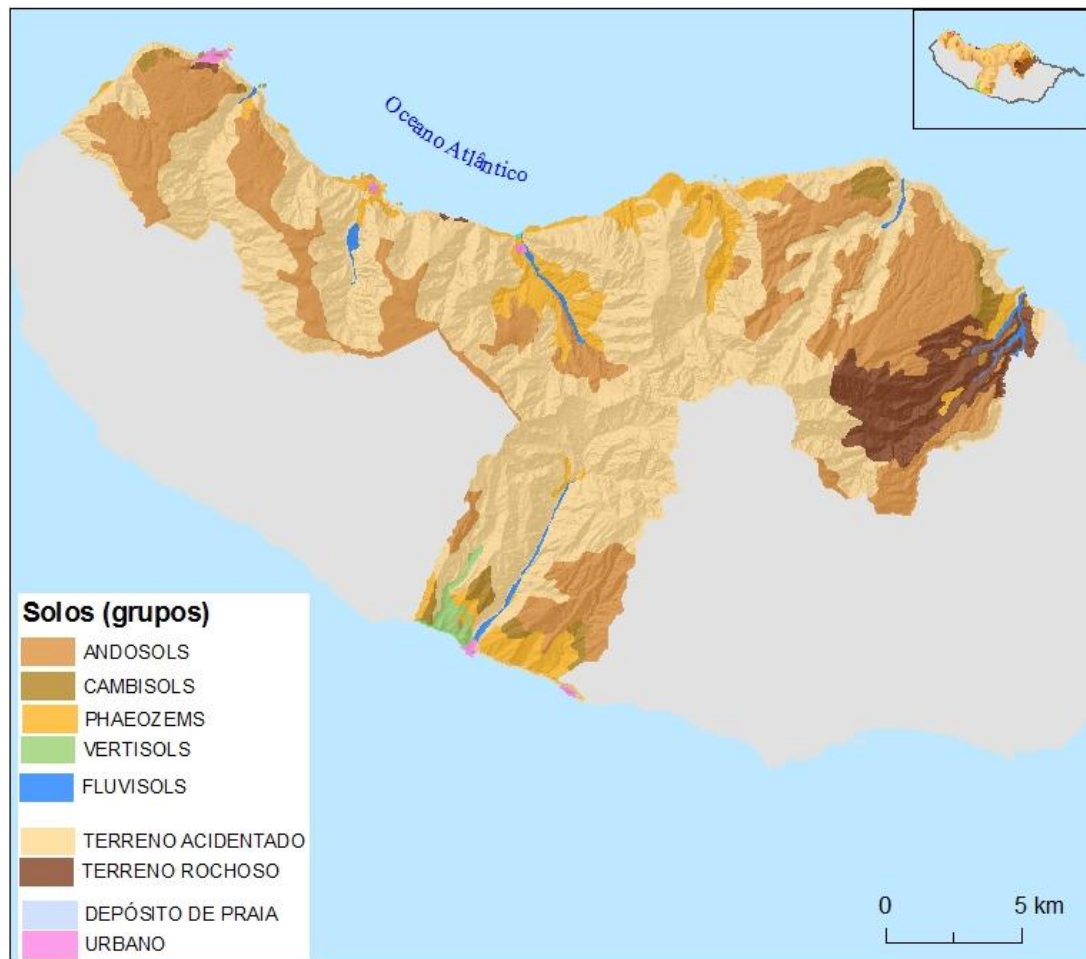


Figura 19 - Distribuição espacial dos grupos de solos nos concelhos da área de estudo.

Fonte: Carta dos Solos da Ilha da Madeira, SRA.

Na área de estudo, segundo a Carta dos Solos da Ilha da Madeira, SRA. O grupo de solo mais frequente é o Terreno Acidentado, o qual ocupa 55% da área, com distribuição espacial que se estende a todo o território e os Terrenos Rochosos ocupam 5,6% de área, e estão restritos quase apenas ao sector leste da área de estudo, no concelho de Santana. (Fig. 19 e Quadro 7). Os Andossolos ocupam 8852,2 ha (27,4%) da área, e possui também uma distribuição espacial transversal a quase toda a área em estudo. São solos de cor clara, pouco desenvolvidos, compostos por areias e silte. Os Cambissolos são solos com textura arenosa grossa, e com fragmentos de pedras grosseiras, restringem-se a pequenas áreas perto da faixa litoral, ocupam 740,1 ha (2%) da área de estudo. Os

Phaeozems são grupos de solos de matriz composta por materiais cristalizados, com gesso misturado com pequenas quantidades de material detrítica, com textura compacta com apenas algumas cavidades, e geralmente de cor amarelada ou alaranjada, ocupam 2431,2 ha (7,5%) da área de estudo e localizam-se nas áreas intermédias e elevadas junto do litoral e em áreas envolventes dos cursos de água. Os Vertissolos são solos compostos por materiais flúvicos, ocupam 185,8 ha (0,6%) do território, e surgem nas arribas do litoral sul da área em estudo; por outro lado, os Fluvisolos são solos que derivam de depósitos aluvionares, compostos por materiais arenosos pouco consolidados, ocupam 400,6 ha (1,2%) de área total, e estão confinados aos fundos de vales e os Depósitos de praia aparecem apenas junto à linha de costa.

Quadro 7 – Área (ha) e frequência relativa dos solos (grupos) nos concelhos da área de estudo.

| CÓDIGO | CLASSES | Área (ha) | Frequência Relativa (%) |
|--------|--------------------|-----------|-------------------------|
| GS1 | Andosols | 8852,2 | 27,4 |
| GS2 | Cambisols | 740,1 | 2,3 |
| GS4 | Phaeozems | 2431,2 | 7,5 |
| GS5 | Vertisols | 185,8 | 0,6 |
| GS6 | Fluvisols | 400,6 | 1,2 |
| GS7 | Terreno Acidentado | 17757,9 | 55,0 |
| GS9 | Terreno Rochoso | 1820,6 | 5,6 |
| GS3 | Depósito de Praia | 2,4 | 0,0 |
| GS8 | Urbano | 67,7 | 0,2 |

O mapa “ocupação do solo” (Fig. 20 e Quadro 8) foi obtido através da Carta de Ocupação do Solo (COS\2007) da Ilha da Madeira, atendendo à representação designada em Nível 2 para os concelhos da área de estudo.



Figura 20 - Ocupação do Solo nos concelhos da área de estudo.

Fonte: COS2007 segundo nível2, IGP).

Recorrendo ao mapa da Figura 20, as áreas ocupadas por floresta situam-se nas vertentes de altitudes intermédias no sector sul, e no sector norte estas ocupam as vertentes de altitude intermédias e superior, as áreas ocupadas por florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea ocupam principalmente as vertentes de altitudes superiores. As áreas agrícolas heterogéneas localizam-se basicamente nas áreas envolventes do tecido urbano, que por sua vez localizam-se ao longo dos fundos de vales e em alguns planaltos, essencialmente no sector noroeste e nordeste da área em estudo.

Em suma, a vertente norte da área de estudo, possui maior fracção de áreas ocupadas por florestas do que a vertente sul.

Atendendo o Quadro 8, na área em estudo mais de metade da área é ocupada pelas florestas (18172,1 ha), correspondendo a 56,3%, e florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea (9292,5 ha) equivalendo a 28,8% do território total; em conjunto estas duas classes perfazem 85,1 % da área em estudo. As áreas agrícolas heterogéneas ocupam uma área de 2445,4 ha (7,4%) da área total. Verifica-se que as áreas de culturas permanentes e tecido urbano apresentam valores aproximados, com 900,8 ha (2,8%) e 759,0 ha (2,4%), respectivamente do território em estudo. As restantes áreas são ocupadas por outras classes menos representadas, cujos valores de cada uma das classes não atingem 1% da área de estudo.

Quadro 8 – Área (há) e frequência relativa das classes de ocupação do solo nos concelhos da área de estudo.

| CÓDIGO | CLASSES | Área (ha) | Frequên cia Relativa (%) |
|--------|---|--------------|-----------------------------------|
| OS1 | Tecido Urbano | 759,0 | 2,4 |
| OS2 | Indústria, Comércio e Transportes | 183,8 | 0,6 |
| OS3 | Áreas de extracção de Inertes, Deposição de resíduos e de Estaleiros | 21,0 | 0,1 |
| OS4 | Espaços Verdes Urbanos, Equipamentos Desportivos, Culturais e de Lazer e Zonas Históricas | 48,5 | 0,2 |
| OS5 | Áreas Agrícolas Heterogéneas | 2445,4 | 7,6 |
| OS6 | Culturas Permanentes | 900,8 | 2,8 |
| OS7 | Pastagens Permanentes | 82,2 | 0,3 |
| OS8 | Florestas | 18172,1 | 56,3 |
| OS9 | Florestas Abertas, Vegetação Arbustiva e Herbácea | 9292,5 | 28,8 |
| OS10 | Zonas Descobertas e com pouca vegetação | 154,6 | 0,5 |
| OS11 | Zonas Húmidas | 38,9 | 0,1 |
| OS12 | Corpos de Água | 158,7 | 0,5 |

CAPÍTULO III - MOVIMENTOS DE VERTENTE: CARACTERÍSTICAS E FACTORES CONDICIONANTES

1. OS MOVIMENTOS DE VERTENTE

1.1. Conceitos Gerais

Existe uma grande diversidade de classificações de movimentos de vertente na literatura, que tem por base diferentes factores para a caracterização dos fenómenos. Entende-se por movimentos de vertente “movimentos de descida (gravíticos), numa vertente, de uma massa de rocha ou solo em que o centro de gravidade do material afectado progride para jusante e para o exterior” (Varnes, 1978; Cruden, 1991 *in* Terzaghi, 1952, p.4). Todos os movimentos verticais de abatimento e assentamento (subsidência), as avalanchas de neve e os efeitos da expansão/retracção dos solos argilosos ficam excluídos desta categoria.

As classificações mais simples recorrem a apenas um critério de classificação. As classificações mais complexas utilizam, normalmente, um factor discriminante principal para descrever os grandes tipos de movimentos, e factores secundários para introduzir subdivisões dentro das categorias iniciais (Zêzere, 2000).

Adopta-se no presente estudo, a classificação proposta pelo grupo de trabalho da UNESCO designado pelo Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI, 1993)³, com as respectivas adaptações recomendadas por Rodrigues e Ayala-Carcedo (2000, 2002a), Rodrigues (2005), Utecht *et al.* (2008), Nguyen *et al.* (2010), Wiatr *et al.* (2009) e Rodrigues *et al.* (2010), aplicadas à Ilha da Madeira e a ambientes insulares.

Segundo o grupo de trabalho WP/WLI (1993) existem cinco tipos de movimentos de vertente (Fig. 21): **Desabamentos; Tombamento; Deslizamentos/Escurregamentos; Expansão lateral; Escoadas.**

Cada tipo de movimento distingue-se pelo mecanismo de ruptura e adicionalmente, pelo tipo de material afectado. Cruden e Varnes (1996) consideram também a actividade, velocidade e conteúdo em água como critérios secundários de classificação.

³Grupo de trabalho patrocinado pela UNESCO no âmbito da Década Internacional para a Redução das Catástrofes Naturais, envolvendo 3 sociedades geotécnicas internacionais.

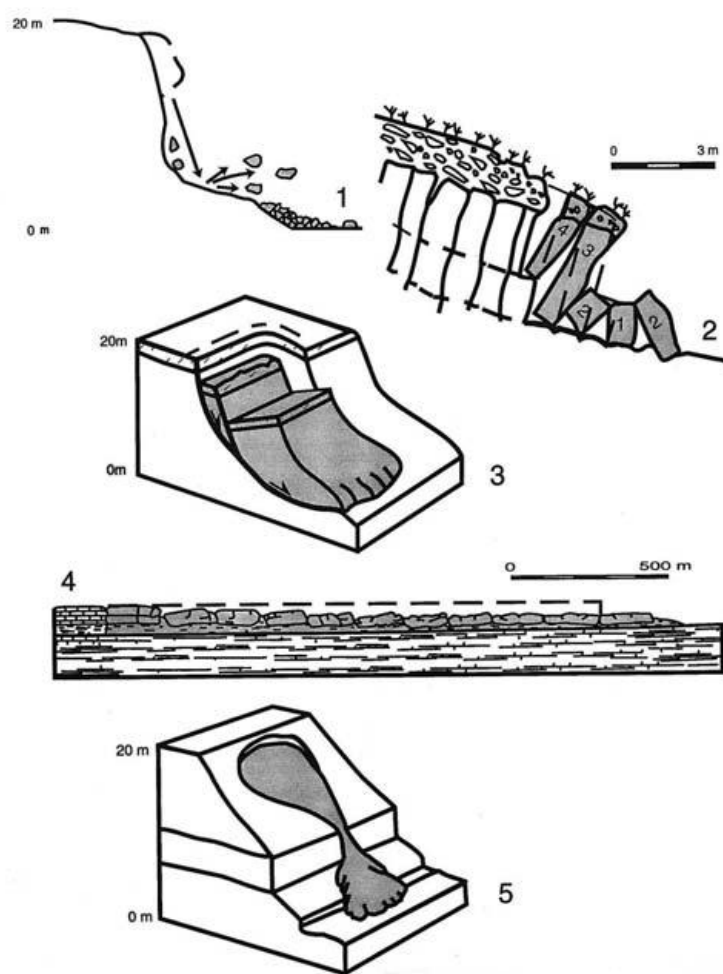


Figura 21 - Tipologia dos Movimentos de Vertente: 1. Desabamentos; 2. Tombamento; 3. Deslizamentos/Escurregamentos; 4. Expansão lateral; 5. Escoadas.

Fonte: UNESCO WP/WLI (1993).

1. **Desabamentos:** queda livre de rochas ou solos de uma vertente, talude ou escarpa, em que a superfície de deslizamento está ausente ou é muito reduzida; este tipo de movimento pode consequentemente levar a fenómenos de salto e/ou rolamento dos materiais de queda;
2. **Tombamento:** rotação de massas de rocha a partir de um ponto situado abaixo do centro de gravidades da massa afectada;
3. **Deslizamentos/Escurregamentos:** movimento numa vertente ou talude de solo ou rocha ao longo de uma superfície de rotura, com efeitos de intensa deformação tangencial;

4. **Expansão lateral:** extensão de terrenos coesivos, solo ou rocha, combinada com subsidência geral;

5. **Escoadas:** movimentos espacialmente contínuos onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e raramente preservadas; a morfologia da massa deslocada assemelha-se a um fluído viscoso.

No que concerne aos deslizamentos, dividem-se em translacionais e rotacionais de acordo com a forma da superfície do deslizamento, respectivamente planar ou côncava.

Os deslizamentos translacionais ocorrem ao longo de superfícies de ruptura planares ou com uma ligeira ondulação; assim, a massa deslocada é com frequência evacuada para além de superfície de ruptura do movimento. O plano de deslizamento desenvolve-se ao longo de superfície de fraqueza, marcada por uma reduzida resistência ao corte, tais como falhas, planos de estratificação, diáclases ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso (Varnes, 1978).

Os deslizamentos rotacionais ocorrem ao longo de superfícies de ruptura curvas, com forma côncava, e afectam geralmente terrenos homogéneos e isotrópicos. A topografia é característica: o movimento apresenta uma rotação que se materializa por um abatimento a montante e, conseqüentemente, por um levantamento do seu sector frontal, formando frequentemente aclives pronunciados (Hutchinson, 1988).

Este estudo debruça-se apenas na análise de deslizamentos; conjuntamente com o levantamento dos deslizamentos efectuou-se também a identificação das escoadas, por serem fenómenos que ocorrem com frequência na área de estudo, mas não foram utilizadas no presente trabalho.

1.2. Características dos Deslizamentos Inventariados

Conforme já foi referido anteriormente no ponto 2.1 do Capítulo II, a inventariação para a área de estudo foi efectuada exclusivamente com recurso a fotointerpretação de ortofotos de grande resolução (0,4m). É de referir que os resultados da inventariação de movimentos de vertente com base em fotointerpretação devem ser complementados com os levantamentos geomorfológicos de campo, constituindo uma etapa importante para a validação dos modelos preditivos. Todavia, não foi possível realizar levantamentos de campo para este trabalho, situação justificada por falta de tempo disponível e de logística, e impossibilidade de acesso aos locais da área de estudo. Esta limitação fez com que fossem rejeitadas centenas de “possíveis” deslizamentos, para

salvaguardar a qualidade da base de dados utilizada, visto que apenas se utilizaram as ocorrências que ofereciam grau de confiança elevado. Da mesma forma, a ausência de trabalho de campo inviabilizou a diferenciação entre tipos de deslizamentos, o que teria possibilitado a realização de análises separadas.

Refira-se ainda que foram efectuados levantamentos e inventariação das escoadas ocorridas na área de estudo, por serem fenómenos muito frequentes. Porém, devido à falta de oportunidade e à complexidade de análise, e porque o objecto de estudo incidia apenas em deslizamentos, não se avançou para o estudo deste tipo de fenómenos.

Do inventário efectuado na área de estudo contabilizou-se 1257 deslizamentos, o que perfaz uma densidade de 3,8 ocorrências por km² com um total de área deslizada de 31,3 ha, ou seja 0,09% do território total (Fig. 22 e Quadro 9). A dimensão média dos deslizamentos é de 249 m² e o maior deslizamento cartografado na área de estudo possui 2881,6 m² (Quadro 9), e localiza-se no concelho de Santana; por outro lado, o menor deslizamento encontrado possui 40,7 m² e situa-se no concelho de São Vicente.

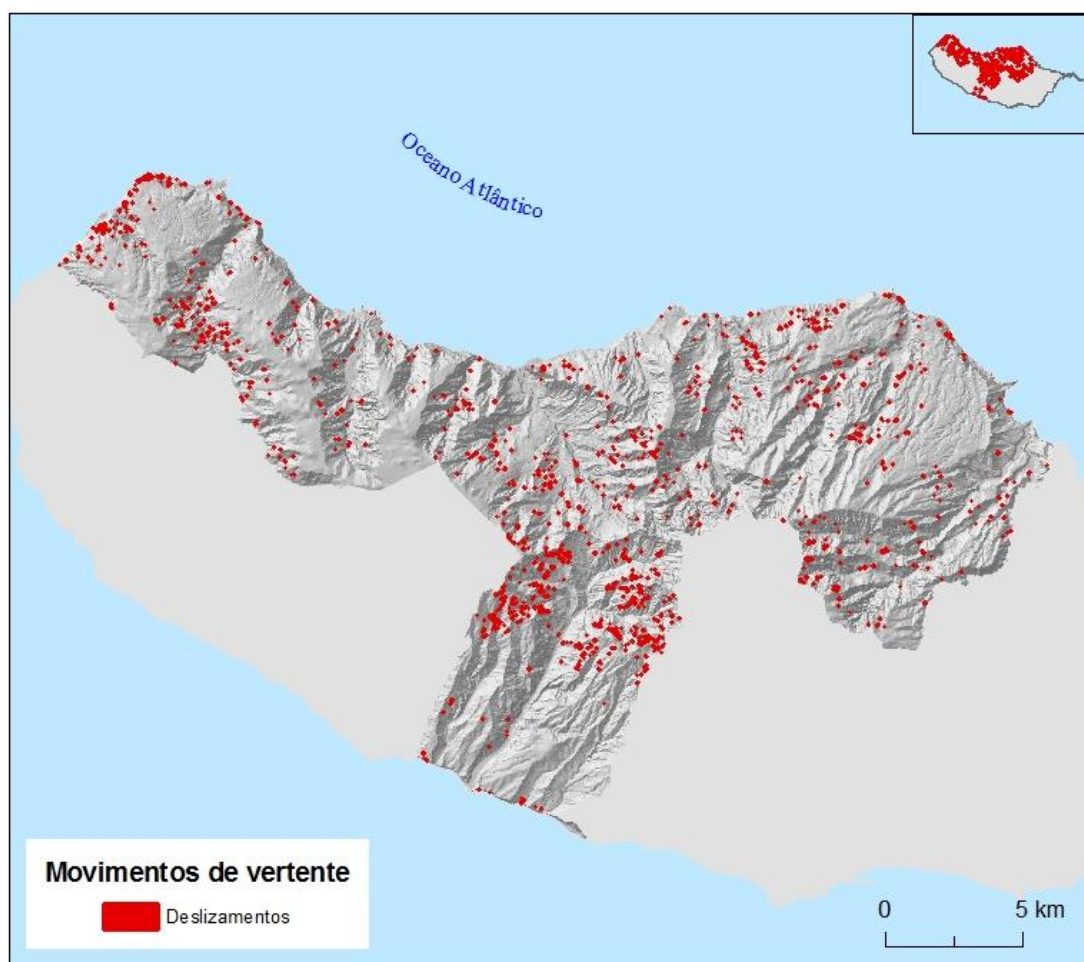


Figura 22 - Distribuição dos deslizamentos baseado em fotointerpretação nos concelhos da área de estudo.

Quadro 9 – Características do inventário de deslizamentos nos concelhos da área de estudo.

| Nº de deslizamentos | Área total (ha) | % da área de estudo | Área (m ²) dos deslizamentos | | | |
|---------------------|-----------------|---------------------|--|--------|-------|---------------|
| | | | Mín | Máx | Média | Desvio Padrão |
| 1257 | 31,3 | 0,09 | 40,7 | 2881,6 | 249,1 | 257,6 |

2. FACTORES CONDICIONANTES E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DESLIZAMENTOS

Segundo Crozier e Glade (2005), em consonância com três estádios de estabilidade (estabilidade, estabilidade marginal e instabilidade activa), as causas dos movimentos de vertente podem subdividir-se em: factores de predisposição, factores preparatórios e factores desencadeantes.

Os factores de predisposição são estáticos e inerentes ao terreno (e.g. estrutura geológica, litologia, orientação das vertentes), condicionando o grau de instabilidade potencial da vertente e determinando a variação espacial do grau da susceptibilidade do território à instabilidade. Os factores preparatórios são dinâmicos (e.g. antrópicos) promovendo o decréscimo na margem da estabilidade, mas sem iniciar o movimento. Os factores desencadeantes (e. g. precipitação intensa e/ou prolongada e ocorrência de sismos), como o próprio nome sugere, representam a causa imediata da instabilidade determinando o ritmo temporal dos movimentos de vertentes.

Conforme a sistematização apresentada por Popescu (1994), as características do terreno funcionam como factores de predisposição da instabilidade. Os processos geomorfológicos, físicos e antrópicos funcionam como mecanismos preparatórios ou desencadeantes da instabilidade (consoante a sua intensidade e duração, bem como o estágio prévio da estabilidade da vertente). Neste sentido, os factores de predisposição e os preparatórios constituem, em conjunto, os factores condicionantes.

Este trabalho basear-se-á na sistematização proposta por Popescu (1994) para explicação das causas dos movimentos de vertentes, e utiliza-se a designação para factores condicionantes quando refere-se aos factores de instabilidade geológica, factores morfológicos e morfométricos.

2.1. Declives

O declive é um dos temas com elevada importância na avaliação da susceptibilidade, uma vez que determinam directamente as tensões tangenciais que se observam nas vertentes. Porém, esta condicionante assume um papel “fundamental na ocorrência de movimentos de massa em vertente, especialmente na ausência de coberto vegetal, pois quanto maior for o declive maior será a influência de forças como a gravidade sobre o terreno das vertentes” (Teixeira, 2005, *in* PME-PC Câmara Municipal de Funchal, 2011). Geralmente, declives a partir dos 25° e em solos alterados, potenciam a ocorrência de movimentos de massa em vertente (Almeida *et al.*, 2010).

Na Figura 23 apresenta-se a distribuição da área deslizada total por áreas de cada classe. A sua análise revela que para a área de estudo a maioria da área deslizada ocorreram em declives > 45° (43%) e declives entre 35° e 45° (31%), o que equivale a 74% do total da área deslizada, embora, no conjunto, estas duas classes ocupem menos de 45% da área de estudo. Também se pode observar que as proporções de áreas deslizadas em cada

classe registam uma subida linear em relação à proporção ocupada por cada classe na área de estudo; este facto evidencia de forma clara que o aumento dos valores de declive se manifesta num aumento da influência sobre a ocorrência de deslizamentos (Fig. 23).

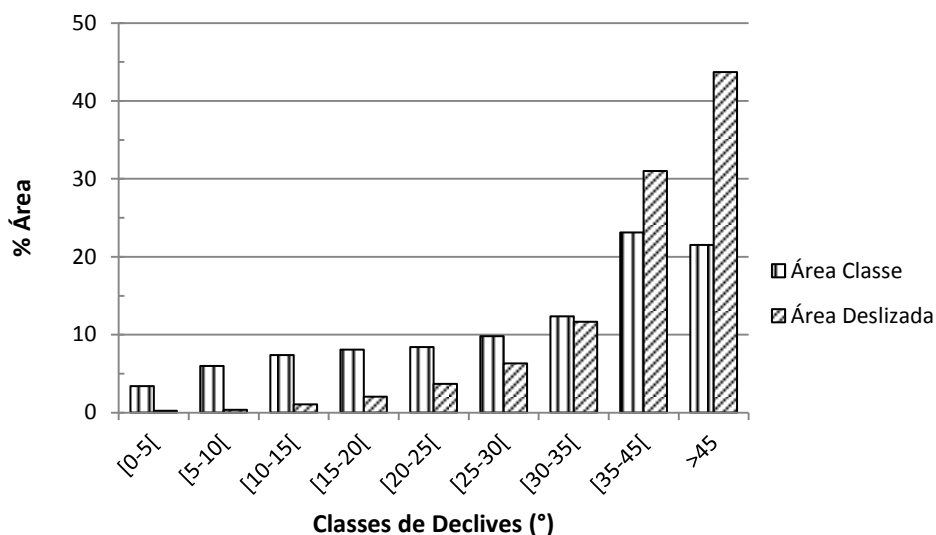


Figura 23 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de declive (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de declive (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo.

Por isso, quando se analisa a afectação de cada classe de declive por deslizamentos observa-se que as classes mais afectadas foram as duas com maiores valores de declive ($>45^\circ$ e $35^\circ - 45^\circ$) (Fig. 24), ou seja, à medida que aumentam os valores de declive também aumenta a sua importância na explicação da ocorrência dos deslizamentos na área em estudo.

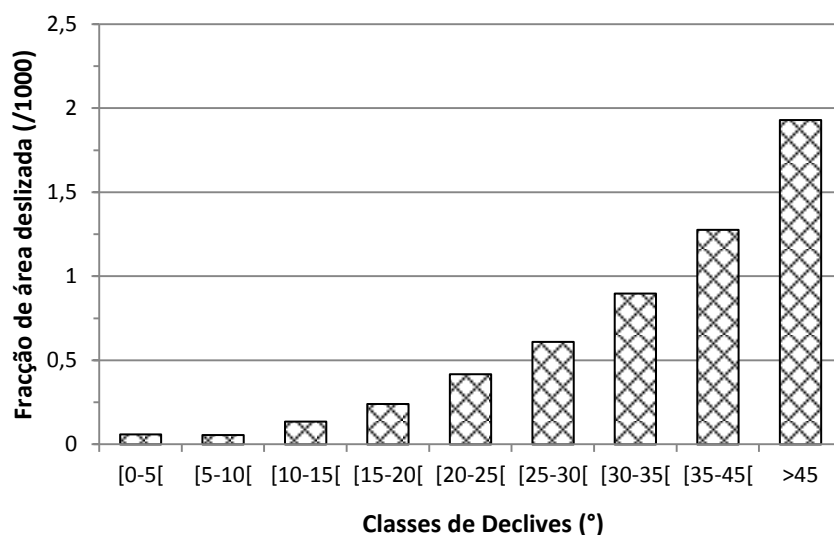


Figura 24 - Proporção de área de cada classe de declive afectada por deslizamentos nos concelhos da área de estudo.

2.2. Exposição das Vertentes

A exposição das vertentes indica-nos a insolação que as vertentes recebem. No hemisfério norte as vertentes voltadas a sul estão mais expostas ao Sol, portanto, recebem mais insolação (vertentes soalheiras) enquanto as vertentes a norte têm mais período de sombra (vertentes sombreiras), podendo este facto, condicionar a existência de maior ou menor humidade nos solos (Piedade, 2009). Assim, numa região com relevo muito acidentado e de altas montanhas, em que a altitude média chega aos 650 metros, como é o caso da área de estudo, as exposições das vertentes podem constituir particularidades físicas e climáticas relevantes, no que tange a dinâmica das vertentes.

No que tange à distribuição das áreas deslizadas pelas classes e às áreas de cada classe de exposições de vertente a tendência é de quase regular, com grande maioria dos deslizamentos a ocorrerem em vertentes com exposição a norte (29% da área dos deslizamentos), sendo que a variação nos restantes octantes é bastante fraca, situando-se apenas entre 12% (leste) e 9% (oeste) (Fig. 25). Quando se observa as classes que mais foram afectadas por deslizamentos, em termos relativos, os resultados são similares: a classe de exposição a norte é a mais afectada e as restantes classes apresentam valores aproximados entre eles (Fig. 26). Em ambas as abordagens, a classe “plano” quase não regista movimentos ocorridos, conforme seria de esperar.

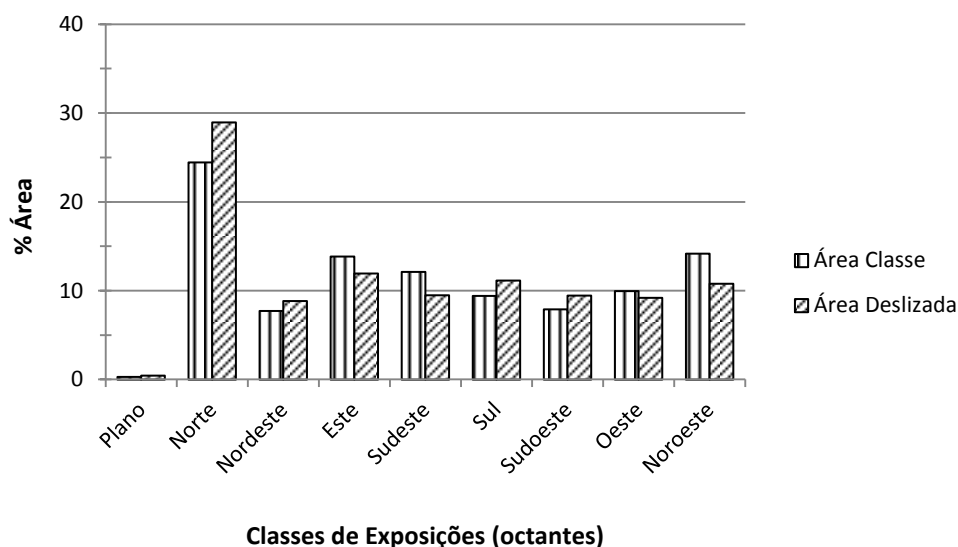


Figura 25 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de exposições (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de exposições (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo.

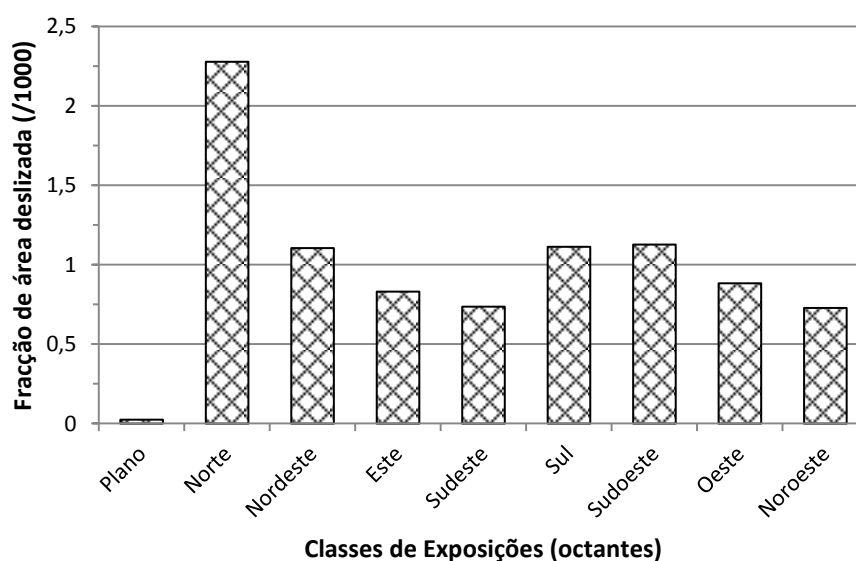


Figura 26 - Proporção de área de cada classe de exposição das vertentes afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo.

2.3. Morfologia das Vertentes

A morfologia das vertentes, através dos perfis transversais, indica-nos as formas de vertentes que em função das suas características possibilita mensurar o grau de influência de cada tipo de vertente na ocorrência de deslizamentos. Assim, “se as vertentes forem rectilíneas, com declives acentuados e constituídas por materiais impermeáveis, há promoção do escoamento superficial”, advindo uma menor pressão

interna nas vertentes por acumulação de água (Teixeira, 2005). Pelo contrário, se essas vertentes apresentarem acumulação de água, a consequente saturação dos terrenos das vertentes é facilitada, o que pode gerar mais facilmente o movimento de massa em vertentes.

Na área de estudo verifica-se que as vertentes com perfil transversal convexo são mais representativas, constituindo cerca de 40,3% da área, sendo que as vertentes côncavas correspondem a 38,9% e as vertentes rectilíneas a 20,8% do território (Fig. 27).

Através das áreas deslizadas dentro das classes dos perfis transversais nota-se que maioria dos deslizamentos ocorreu na classe de vertente de perfil convexo (51%), seguida da classe de perfil côncavo (36%) e na classe de perfil rectilíneo apenas (13%) (Fig. 27). Quanto à fracção de área deslizada por cada classe, constata-se que os resultados são semelhantes em relação à representatividade aos valores registados da área deslizada, destacando-se a classe de perfil convexo como a classe mais afectada (Fig. 28).

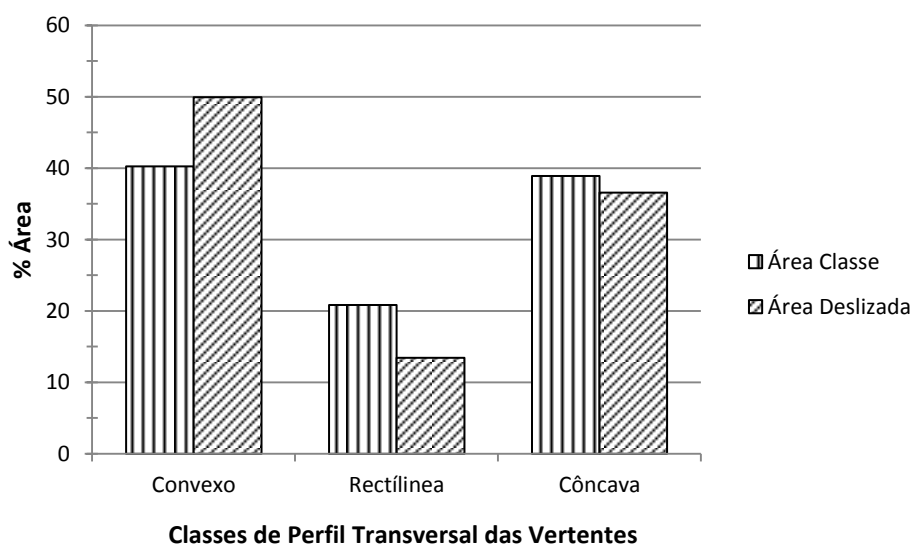


Figura 27 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de perfil transversal das vertentes (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de perfil transversal das vertentes (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo.

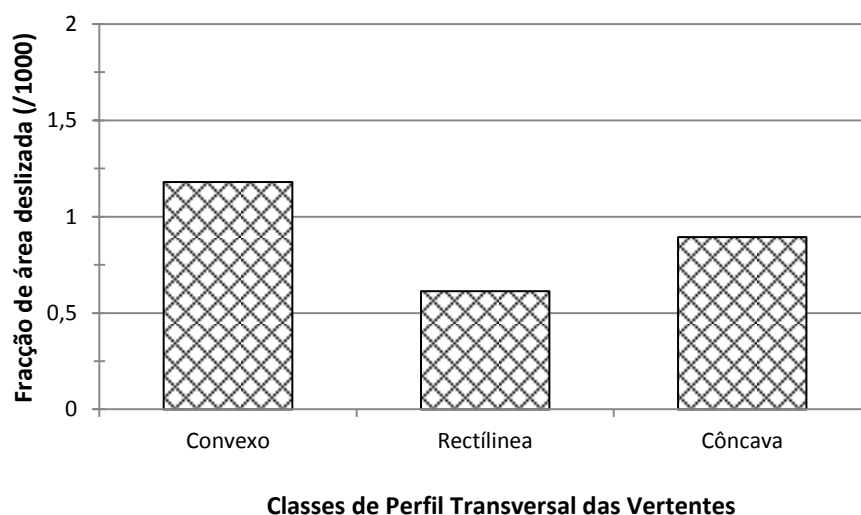


Figura 28 - Proporção de área de cada classe de perfil transversais de vertentes afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo.

2.4. Litologia

O substrato litológico influencia fortemente a ocorrência dos movimentos de vertente, determinando as propriedades de resistência friccional e coesiva, as condições de infiltração, circulação e armazenamento da água no terreno que determinam a sua competência de resistência à ruptura (Teixeira, 2005). O substrato geológico determina assim uma maior ou menor taxa de infiltração. Um aumento do peso e da pressão da água nas formações geológicas, a montante ou no seu interior, promove a perda de coesão e consequente ruptura (Teixeira, 2005). Condiciona, também, o tipo de mecanismo que leva ao movimento de massa em vertente. Mas mais importante é a existência de formações superficiais de alteração, depósitos de vertente, coluviões e solos residuais, as quais são altamente passíveis de movimento (Teixeira, 2005).

Da relação entre as unidades litológicas e os deslizamentos podemos observar que este factor é bastante importante para a explicação do fenómeno, traduzido numa enorme diferenciação entre as classes (Figs. 29 e 30). Quanto à afectação de cada classe por deslizamentos constata-se um cenário idêntico ao das distribuições das áreas das classes, com a particularidade de ocorrerem fracções de áreas deslocadas significativas na classe “Rochas máficas muito alteradas: hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos” e “Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados: tufos de escórias e *lapilli*, piroclastos”, UL16 e UL6, respectivamente.

Refira-se ainda que em determinadas classes, com baixa representação espacial, o facto de serem atingidas por uma parte de alguns deslizamentos pode levar à existência de valores de fracção deslizada relativamente elevados, tal como acontece com as classes “UL6”, “UL9”, “UL10” e “UL16” (Fig. 30).

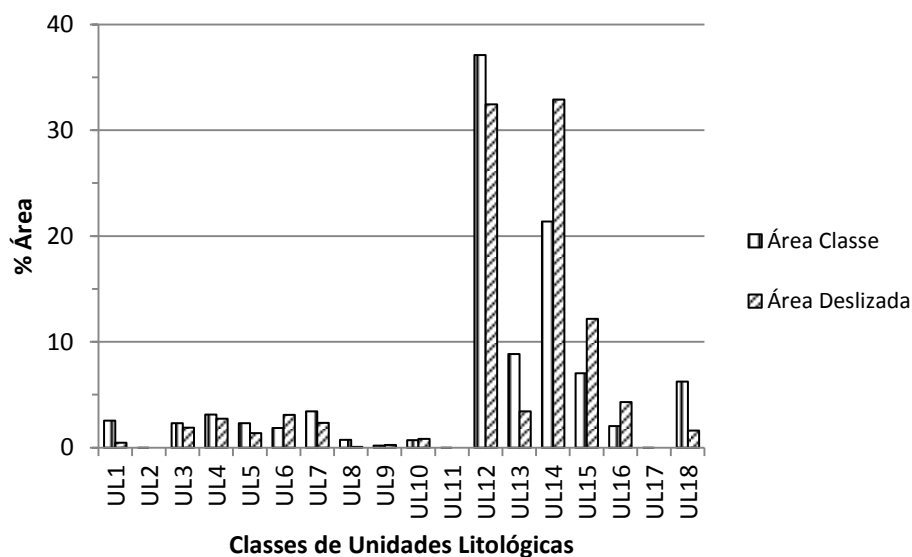


Figura 29 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de unidades litológicas (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de unidades litológicas (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 6 ou 12.

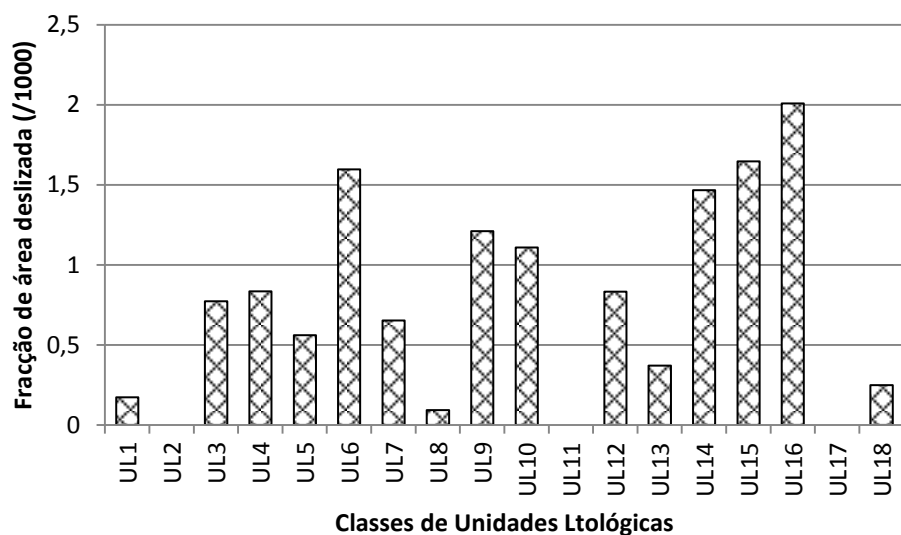


Figura 30 - Proporção de área de cada classe de unidades litológicas afectadas por deslizamentos nos Concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 6 ou 12.

2.5. Solos

O conhecimento da tipologia e da extensão dos solos é muito importante para perceber a dinâmica geomorfológica associada aos movimentos de vertente. Constitui, um importante factor condicionante para os deslizamentos translacionais superficiais, se há existência de formações superficiais de alteração, depósitos solos residuais, as quais são altamente passíveis de movimento (Teixeira, 2005).

Cruzando os mapas dos grupos de solos com deslizamentos verifica-se que a maior área afectada por deslizamentos coincide com a classe predominante na área em estudo, ou seja, 83% da área instabilizada ocorre na classe identificada como “terrenos acidentados” “GS6”, a qual ocupa 55% da área de estudo (Fig. 31). Nota-se, por isso, que esta classe é também a que apresenta a maior fracção de área com deslizamentos (Fig. 32), embora as áreas de “terrenos rochosos” “GS7” e de “Cambisols” “GS2” possam também alguma relevância.

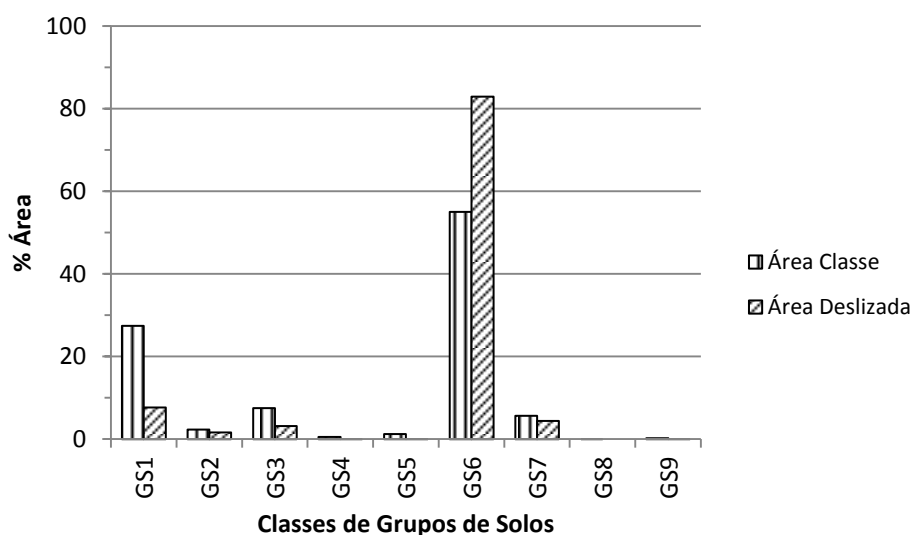


Figura 31 - Frequência relativa (%) da área de cada classe dos grupos de solos (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe dos grupos de solos (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 7 ou 12.

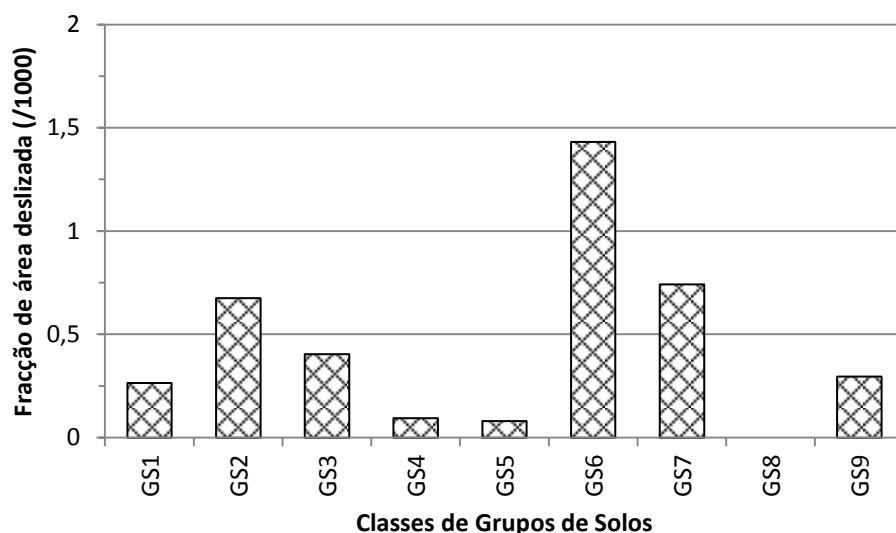


Figura 32 - Proporção de área de cada classe de grupo de solos afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 7 ou 12.

2.6. Ocupação do Solo

O coberto vegetal tem influência no desencadeamento de movimentos de massa em vertentes, especialmente quando a vegetação está ausente, uma vez que a sua presença funciona como factor de coesão. Há no entanto situações em que a presença de vegetação, especialmente de algumas espécies de maior porte, pode promover os movimentos, pelo efeito de alargamento de fracturas pelas raízes, accionando deslizamentos (Teixeira, 2005).

A distribuição das áreas deslizadas pelas grandes classes de ocupação de solo é distinta em relação a proporção de área de cada classe (Fig. 33): 97% da área deslizada ocorre nas classes “florestas” (OS8) e “florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea” (OS9), as quais ocupam, em conjunto, 85% da área total. Quando se analisa a afectação de cada classe de ocupação por deslizamentos, a classe de ocupação mais susceptível é a de “florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea” e a classe “florestas” possui também um valor relevante. No entanto, destacam-se algumas classes pouco representativas espacialmente na área de estudo (que ocupam, cada uma, menos de 0,4% da área de estudo) surgem com fracções de área deslizada bastante importantes, tal como acontece com as classes “pastagens permanentes” (OS7), “zonas húmidas” (OS11) e “corpos de água” (OS12); há que ter em conta, nestes casos, o efeito possível da generalização da informação, em que pequenas áreas dos polígonos de deslizamentos

passam, no processo de conversão de estrutura vectorial para matricial, a coincidir com uma pequena área daquelas classes (não se excluindo, também, a possibilidade de pequenas incorrecções na delimitação dos polígonos dos deslizamentos); por isso se observa, do mesmo modo, um valor anormalmente elevado da fracção deslizada na classe "corpos de água" (OS12) e "zonas húmidas" (OS11), quando seria expectável a ausência de deslizamentos nesta classe de ocupação do solo (Fig. 34).

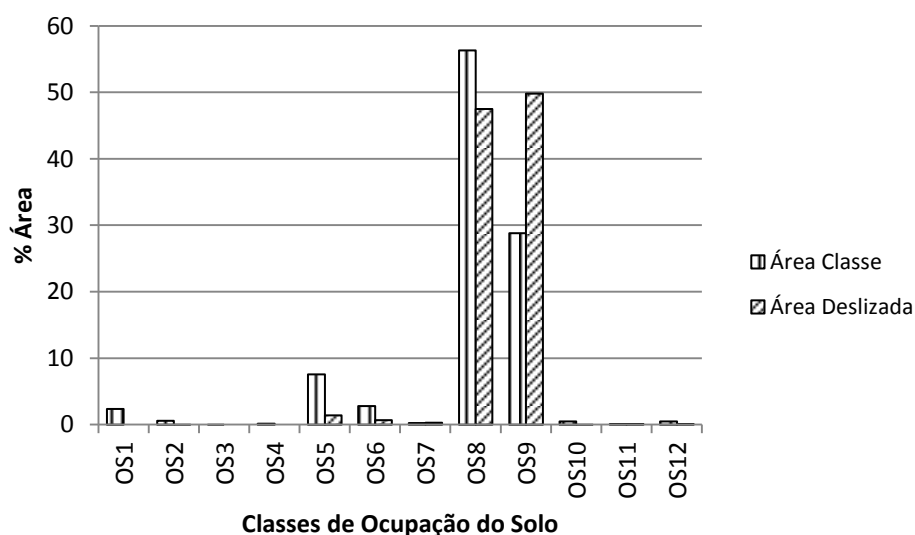


Figura 33 - Frequência relativa (%) da área de cada classe de ocupação do solo (em relação à área de estudo) e da área deslizada em cada classe de ocupação do solo (em relação ao total da área deslizada) nos concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 8 ou 12.

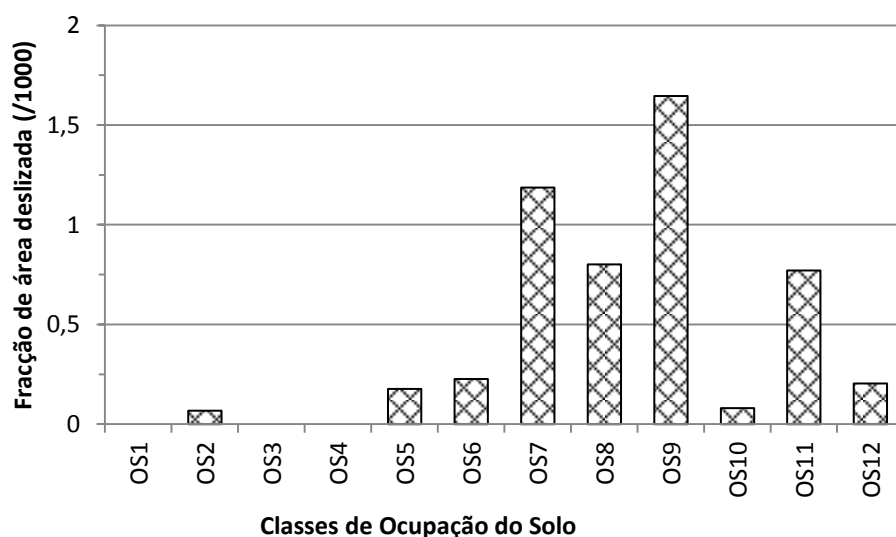


Figura 34 - Proporção de área de cada classe de ocupação do solo afectadas por deslizamentos nos concelhos da área de estudo. Para significado das siglas ver Quadros 8 ou 12.

CAPÍTULO IV – AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS

1. MODELO CONCEPTUAL DO RISCO

Embora este estudo incida apenas na avaliação da susceptibilidade, é pertinente clarificar alguns conceitos que se integram no modelo de risco e que se relacionam com a susceptibilidade. Entende-se por susceptibilidade a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno numa dada área, com base nos factores condicionantes da instabilidade, independentemente do seu período de recorrência (Zêzere, 2005b).

Define-se a Perigosidade como a probabilidade de ocorrência de um fenómeno [deslizamento] potencialmente destruidor, num determinado período de tempo e numa da área (Varnes, 1984, Guzzetti, 2000; Cardinali *et al.*, 2002).

A terminologia internacional, sistematizada por Varnes em 1984, define a vulnerabilidade como o grau de dano de um elemento ou um conjunto de elementos em risco, resultante da ocorrência de um fenómeno com determinada magnitude ou intensidade. A vulnerabilidade expressa-se numa escala que varia entre zero (sem danos) a um (perda total do elemento vulnerável).

O risco é entendido como a probabilidade e severidade expectável do número de vidas perdidas, pessoas feridas, danos em propriedades ou interrupções de actividades económicas, devido a um fenómeno particular; o risco pode ser estimado em termos específicos ou totais (Varnes, 1984; Zêzere, 2005b). O risco específico é determinado para cada elemento através do produto entre a perigosidade e a vulnerabilidade. Por seu turno, o risco total obtém-se acrescentado ao produto anterior o valor dos elementos em risco e tendo em conta as eventuais perdas e prejuízos directos e indirectos. Segundo Varnes (1984), o risco total exprime a possibilidade de ocorrência de consequências económicas gravosas e para a segurança das pessoas, em resultado da ocorrência de um fenómeno natural ou induzido pela actividade antrópica.

A Figura 35 ilustra o esquema conceptual do risco, na intersecção entre a perigosidade, a vulnerabilidade e o valor dos elementos em risco. A relação entre estes parâmetros é dada pela Equação 1. Registe-se que o modelo conceptual ilustrado nesta figura é aplicável aos diferentes tipos de fenómenos naturais perigosos que podem ter expressão

num território (e.g. actividade sísmica, actividade vulcânica, fenómenos climáticos extremos, dinâmica hidrológica, instabilidade geomorfológica, entre outros).



Figura 35 - Esquema conceptual do risco natural (Zêzere, 2007).

Assim, o Risco (R) traduz-se como:

$$R = P \times V \times E \quad \text{Eq. [1]}$$

Onde P é a Perigosidade, V é a Vulnerabilidade, e E é o Valor dos elementos em perigo.

1.1. Métodos Estatísticos

Segundo Varnes (1984), "o passado e o presente são a chave para o futuro". Este princípio traduz a ideia de que os deslizamentos futuros irão ocorrer sob as mesmas condições geológicas e geomorfológicas que condicionaram e ou desencadearam os deslizamentos no passado e no presente.

A avaliação da propensão de um território à ocorrência de movimentos de vertente pode ser efectuada através de métodos de cartografia directa e indirecta (Guzzetti *et al.*, 1999) (Fig. 36).

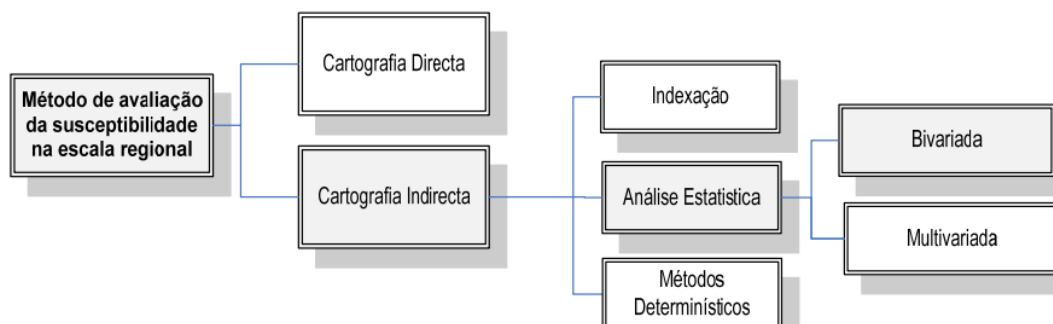


Figura 36 - Métodos cartográficos de avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na escala regional (baseado em Guzzetti *et al.*, 1999).

Os métodos de cartografia indirecta baseiam-se nos factores que condicionam os deslizamentos e a sua localização, ou seja, através destes métodos a subjectividade do geomorfólogo é reduzida, uma vez que são normalizadas técnicas de aquisição, procedimento, análise e representação da informação (Carrara, 1993) possibilitando a construção de modelos (determinísticos, heurísticos ou estatísticos). A ponderação dos factores que condicionam a instabilidade é obtida através da sua representação cartográfica e da análise das suas relações com a distribuição espacial dos deslizamentos.

Estes métodos são aplicados sobre unidades cartográficas definidas *a priori*, como unidades matriciais, unidades de condição única, unidades geológico-geomorfológicas, unidades morfo-hidrográficas, ou unidades administrativas (Guzzetti, 2005).

Os métodos estatísticos introduzem objectividade no processo de avaliação da susceptibilidade e permitem a validação dos resultados, através da determinação das respectivas taxas de predição e de sucesso (Fabbri *et al.*, 2002; Chung e Fabbri, 2003; Guzzetti *et al.*, 2006).

Os modelos de base estatísticos podem ser bivariados e multivariados. Na análise estatística bivariada cada factor condicionante é combinado individualmente com o mapa da distribuição dos movimentos de vertente, atribuindo a respectiva ponderação com base na densidade de movimentos de vertente observada em cada classe de cada variável.

Refira-se que neste estudo será utilizado apenas um método da cartografia indirecta, mais concretamente baseado em um modelo de análise estatística bivariada: Valor Informativo.

2. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS QUALITATIVAS

Neste contexto, a escolha dos factores e a identificação da sua influência conjunta na ocorrência dos deslizamentos é importante, pelo que se torna relevante compreender a forma como as variáveis independentes se encontram associadas. Para o cálculo do grau de associação entre duas variáveis qualitativas foi utilizado o método do Coeficiente de Contingência Modificado (C^*), que foi determinado pela seguinte equação:

$$C^* = \sqrt{\frac{\chi^2}{\chi^2 + N}} \times \sqrt{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Eq. [2]}$$

onde χ^2 é o Qui-quadrado de Pearson, N é o número total de observações da tabela de contingências, e K é o menor valor entre o número de linhas e o número de colunas da tabela de contingências.

Na equação anterior, o valor do qui-quadrado de Pearson (χ^2) foi determinado através da seguinte fórmula:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^C \left[\frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \right] \quad \text{Eq. [3]}$$

onde O corresponde aos valores observados e E aos valores esperados para cada classe.

Os valores observados (O) e esperados (E) obtêm-se, respectivamente, pelas seguintes fórmulas:

$$O = \frac{\text{Valores observados}}{\text{Total de cada classe}} \times 100 \quad \text{Eq. [4]}$$

$$E = \frac{\text{Frequência relativa de cada classe}}{100} \times \text{Total de cada classe} \quad \text{Eq. [5]}$$

O Coeficiente de Contingência Modificado pode oscilar entre 0 (inexistência de associação) e 100 (associação perfeita). O Quadro 10 representa os valores de C^* , que mede o grau de associação das 6 variáveis espaciais utilizadas, para a área em estudo.

Quadro 10 - Grau de associação entre factores de predisposição à ocorrência dos deslizamentos na área de estudo, medido através do Coeficiente de Contingência Modificado (C^*) (as associações mais elevadas estão assinaladas a azul e as mais baixas a castanho-escuro).

| Factores | D | EV | PTV | GS | OS | UL |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D | | 32,7% | 27,0% | 53,9% | 41,4% | 54,6% |
| EV | 32,7% | | 9,2% | 18,0% | 25,5% | 23,1% |
| PTV | 27,0% | 9,2% | | 29,0% | 17,6% | 36,2% |
| GS | 53,9% | 18,0% | 29,0% | | 54,3% | 72,8% |
| OS | 41,4% | 25,5% | 17,6% | 54,3% | | 52,2% |
| UL | 54,6% | 23,1% | 36,2% | 72,8% | 52,2% | |

N = 322583900

Na área de estudo, destaca-se as unidades litológicas (UL) que apresenta uma associação de 72,8% com os grupos de solos (GS) e de 54,6% com o declives (D), que se destacam como as relações mais elevadas. No entanto, constata-se a existência de outras relações relevantes, com C* ligeiramente acima de 50%, entre os grupos de solos e a ocupação do solo (OS), entre os declives e os grupos de solos, e entre a ocupação do solo e unidades litológicas.

Os graus de associação mais baixos são entre as exposições das vertentes e os perfis transversais das vertentes com apenas 9,2%; outros valores calculados, também relativamente baixos, são entre a ocupação do solo e os perfis transversais das vertentes (17,6%), entre as exposições das vertentes (EV) e os grupos de solos (18%) e destes com as exposições das vertentes (25,5%).

Globalmente os valores de correlação entre variáveis são relativamente baixos, não ultrapassando os 50%, o que denuncia a inexistência de fortes graus de associação. Assim, em estudo deste âmbito, a fraca correlação entre variáveis é um bom indicador uma vez que pretende que os factores de predisposição a instabilidade das vertentes sejam independentes entre eles. A excepção poderá ser a utilização da variável “grupo de solos”, a qual, como se viu, possui uma dependência relativamente forte das “unidades litológicas” (Quadro 10).

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DO VALOR INFORMATIVO

O modelo de avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos utilizado consistiu no Valor Informativo (Yin e Yan, 1988; Zêzere, 2002), aplicado numa base digital matricial com células de 5 metros.

O método do Valor Informativo tem uma base Bayesiana, sustentando-se na transformação logarítmica (log natural) da razão entre probabilidade condicionada e probabilidade *a priori*. O Valor Informativo (I_i) para qualquer variável independente X_i foi determinado pela seguinte equação:

$$I_i = \log \frac{S_i}{N_i} / \frac{S}{N} \quad \text{Eq. [6]}$$

onde:

S_i = nº de células com deslizamentos na variável X_i ;

N_i = nº de células com a variável X_i ;

S = nº total de células com deslizamentos;

N = nº total de células na área de estudo.

Segundo Yin e Yan (1988) quando o valor de li é negativo, considera-se que o factor em questão (aqui considerado cada uma das classes de cada variável) não é determinante no desenvolvimento dos deslizamentos. Os resultados positivos indicam uma relação entre a presença do factor e a presença da instabilidade, sendo esta tanto mais acentuada quanto maior for o *score* de valor informativo (Yan, 1988).

O valor de susceptibilidade para cada célula j foi calculado pelo Valor Informativo total dado pela seguinte equação:

$$I_j = \sum_{i=0}^m X_{ij} I_i$$

Eq. [7]

onde:

I_j = Valor Informativo da unidade de terreno;

m = nº de variáveis;

X_{ij} = 1 ou 0, consoante a variável X_i está ou não presente na célula j , respectivamente.

Devido à normalização logarítmica, I_i não é determinável quando $S_i = 0$ (impossibilidade de determinar o logaritmo natural de zero). Nestes casos, devido ao carácter não neutro e não nulo de $VI=0$, o valor de I_i foi assumido como igual ao I_i mais baixo determinado para as diferentes classes da variável considerada, o que, no presente trabalho, corresponde a -3,625.

Assim, na área de estudo, o valor mínimo de VI verificado ocorreu nas classes seguintes: EV1 (plano); UL11 (Depósitos sedimentares marinhos: conglomerados e micro-conglomerados, calcários e calcarenitos), UL2 (Cascalheiras e areias de praias) e UL17 (Traquitos); GS8 (depósitos de praia); OS4 (Espaços Verdes Urbanos, Equipamentos Desportivos, Culturais e de Lazer e Zonas Históricas;), OS1 (tecido urbano) e OS3 (Áreas de extracção de Inertes, Deposição de resíduos e de Estaleiros).

O VI de cada variável considerado para a elaboração do mapa de susceptibilidade é apresentado nos Quadros 11 e 12. A análise do significado de cada VI no referido quadro traduz-se na assunção de que quanto mais alto for o valor mais influência a

variável tem na explicação da ocorrência espacial dos deslizamentos. Quando o VI de uma variável é negativo, significa que existe uma relação negativa com a ocorrência de instabilidade, pelo que um VI negativo elevado é indicador de estabilidade nas vertentes.

Quadro 11 - Valor Informativo (*scores*) para cada classe das variáveis derivadas do MNE (declive, exposição e forma das vertentes) na área de estudo.

| VARIÁVEIS | CÓDIGO | CLASSES | SCORES |
|----------------------------------|--------|---------------|--------------|
| DECLIVES (°) | D1 | 0 – 5 | -2,775 |
| | D2 | 5 – 10 | -2,835 |
| | D3 | 10 – 15 | -1,941 |
| | D4 | 15 – 20 | -1,375 |
| | D5 | 20 – 25 | -0,821 |
| | D6 | 25 – 30 | -0,445 |
| | D7 | 30 – 35 | -0,057 |
| | D8 | 35 - 45 | 0,294 |
| | D9 | >45 | 0,707 |
| EXPOSIÇÕES DAS VERTENTES | EV1 | Terreno Plano | -3,625 |
| | EV2 | N | 0,169 |
| | EV3 | NE | 0,149 |
| | EV4 | E | -0,135 |
| | EV5 | SE | -0,255 |
| | EV6 | S | 0,156 |
| | EV7 | SW | 0,169 |
| | EV8 | W | -0,073 |
| | EV9 | NW | -0,268 |
| PERFIL TRANSVERSAL DAS VERTENTES | PTV1 | Convexo | 0,215 |
| | PTV2 | Rectilínea | -0,438 |
| | PTV3 | Côncava | -0,061 |

Quadro 12 - Valor Informativo (*scores*) para cada classe das variáveis qualitativas (litologia, solos e ocupação do solo) na área de estudo.

| VARIÁVEIS | CÓDIGO | CLASSES | SCORES |
|----------------------|--------|--|--------|
| Unidades Litológicas | UL1 | Aluviões | -1,711 |
| | UL2 | Cascalheiras e areias de praias | -3,625 |
| | UL3 | Depósitos de fácies conglomeráticas e brechóides associados a fluxos de detritos e de lama, e/ou depósitos de movimentos de massa | -0,209 |
| | UL4 | Depósitos de movimentos de massa; brechas sedimentares, conglomerados e mega-blocos de rocha fracturada | -0,132 |
| | UL5 | Depósitos de vertente e coluviões | -0,529 |
| | UL6 | Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados: tufo de escórias e <i>lapilli</i> , piroclastos | 0,516 |
| | UL7 | Depósitos piroclásticos máficos: blocos e bombas, <i>lapilli</i> e cinzas | -0,377 |
| | UL8 | Depósitos piroclásticos máficos: cinzas e <i>lapilli</i> | -2,33 |
| | UL9 | Depósitos piroclásticos traquíticos (tufo de cinzas e pedra-pomes), com intercalações de piroclastos máficos, piroclastos e níveis de tufito | 0,241 |
| | UL10 | Depósitos sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas, associados a fluxos de detritos ou fluxos de lama | 0,151 |
| | UL11 | Depósitos sedimentares marinhos: conglomerados e micro-conglomerados, calcários e calcarenitos | -3,625 |
| | UL12 | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos e basanitos), com intercalações de tufitos e de depósitos piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) | -0,134 |
| | UL13 | Derrames lávicos de composição máfica (basaltos), com intercalações de piroclásticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas basálticas) | -0,944 |
| | UL14 | Derrames lávicos de composição máfica (basanitos e basaltos), com intercalações de tufo basálticos (escórias, <i>lapilli</i> e cinzas) | 0,431 |
| | UL15 | Produtos vulcânicos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados; intercalações sedimentares de fácies conglomeráticas, brechóides e areníticas | 0,548 |
| | UL16 | Rochas máficas muito alteradas: hialoclastitos, brechas hialoclastíticas e derrames lávicos submarinos | 0,746 |
| | UL17 | Traquitos | -3,625 |

| | | | |
|------------------|------|---|--------------|
| | UL18 | Unidades dos Lombos e do Funchal indiferenciados | -1,342 |
| Grupos de Solos | GS1 | Andosols | -1,277 |
| | GS2 | Cambisols | -0,342 |
| | GS3 | Phaeozems | -0,855 |
| | GS4 | Vertisols | -2,312 |
| | GS5 | Fluvisols | -2,461 |
| | GS6 | Terreno Acidentado | 0,409 |
| | GS7 | Terreno Rochoso | -0,247 |
| | GS8 | Depósito de Praia | -3,625 |
| | GS9 | Urbano | -1,168 |
| Ocupação do Solo | OS1 | Tecido Urbano | -3,625 |
| | OS2 | Indústria, Comércio e Transportes | -2,638 |
| | OS3 | Áreas de extracção de Inertes, Deposição de resíduos e de Estaleiros | -3,625 |
| | OS4 | Espaços Verdes Urbanos, Equipamentos Desportivos, Culturais e de Lazer e Zonas Históricas | -3,625 |
| | OS5 | Áreas Agrícolas Heterogéneas | -1,682 |
| | OS6 | Culturas Permanentes | -1,430 |
| | OS7 | Pastagens Permanentes | 0,220 |
| | OS8 | Florestas | -0,170 |
| | OS9 | Florestas Abertas, Vegetação Arbustiva e Herbácea | 0,548 |
| | OS10 | Zonas Descobertas e com pouca vegetação | -2,464 |
| | OS11 | Zonas Húmidas | -0,209 |
| | OS12 | Corpos de Água | -1,535 |

Nas figuras 37 a 42 apresenta-se graficamente a frequência de cada classe em cada variável e o respectivo valor do VI.

É a variável “unidades litológicas” que apresenta o maior número de classes com VI positivo, e, em geral, onde se encontram os valores mais elevados. A classe UL16 (Rochas máficas muito alteradas) é aquela que apresenta o VI mais elevado (0,746), não só entre as classes litológicas mas também de todas as classes das 6 variáveis. Assumem-se também como importantes, com valor superior a 0,4, as classes UL15 (Produtos vulcânicos de composição máfica e sedimentos detríticos indiferenciados), UL6 (Depósitos piroclásticos máficos indiferenciados) e UL14 (Derrames lávicos de composição máfica). Refira-se que, à excepção das classes UL14 e UL15, as classes UL16 e UL6 possuem representatividade espacial relativamente baixa, cada uma inferior ou igual a 2% da área total.

Na variável “declive” observa-se a tendência de aumento gradual do VI a partir da classe D2 (5°-10°) com o aumento da inclinação topográfica. Refira-se que a seguir à variável “unidades litológicas” é o tema “declives” que regista o VI mais elevado,

registado na classe D9 ($> 45^\circ$), com 0,707. Além desta, apenas a classe de declives D8 apresenta VI positivo, com 0,294, pelo que o valor de 35° (ou próximo) poderá funcionar como indicador importante de limiar de ocorrência de deslizamentos na área de estudo. Como tal, as variáveis “unidades litológicas” e “declives”, pelo facto de apresentarem as classes com VI mais elevados, são os que demonstram ter mais importância na explicação da ocorrência de deslizamentos na área de estudo, pelo que será expectável que as áreas em que coincidam declives superiores a 35° e as unidades litológicas UL6, UL14, UL15 e UL6, possuam os valores mais elevados de susceptibilidade à ocorrência destes fenómenos.

Para além disso, de uma forma mais abrangente, segundo os VI calculados para as diversas variáveis, a ocorrência de deslizamentos na área de estudo é potenciada pela conjugação das seguintes condições: vertentes com declive superior a 35° , com perfil transversal convexo, expostas essencialmente a sudoeste, sul, norte e nordeste, talhadas em matérias brandas pouco consolidadas ou em formações alteradas, em áreas classificadas como “terrenos acidentados” e com ocupação preferencial por vegetação pouco densa e de baixo porte.

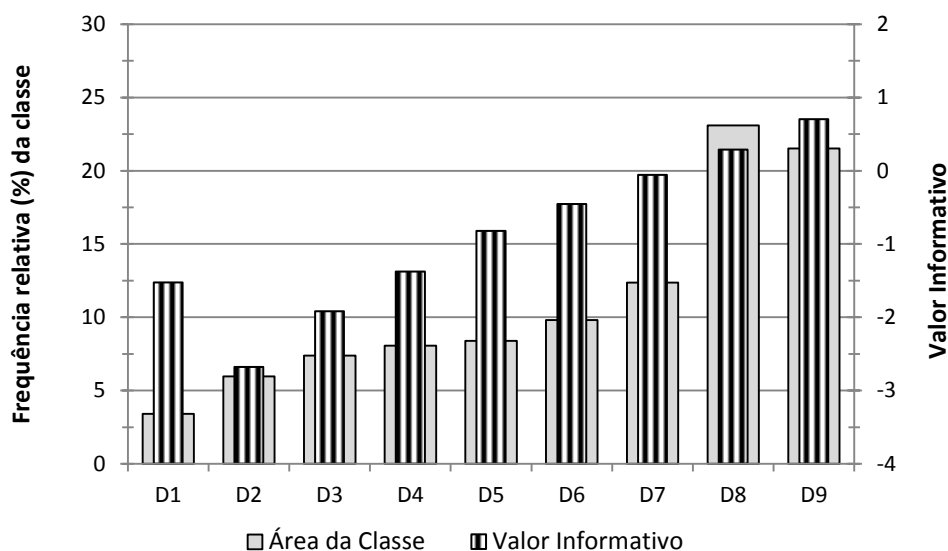


Figura 37 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de declive (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

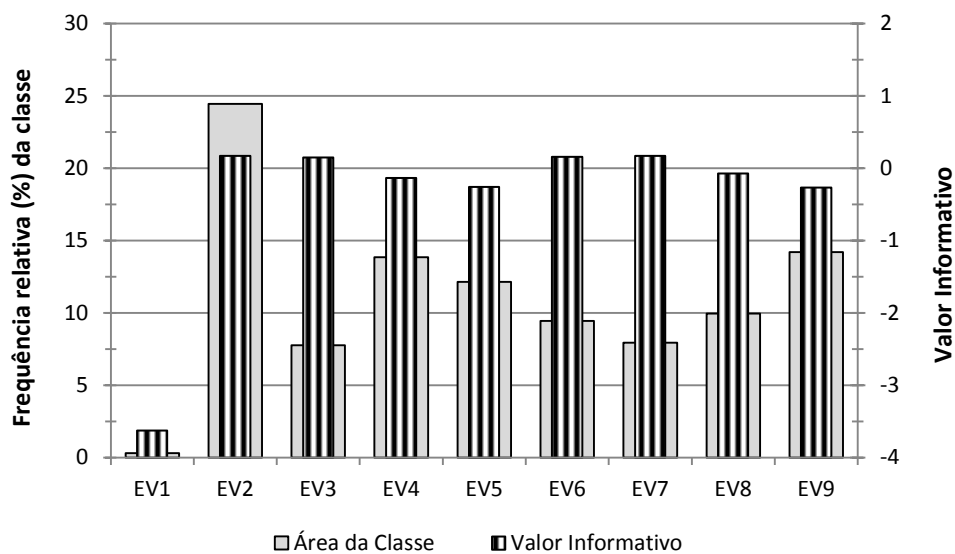


Figura 38 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de exposições das vertentes (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

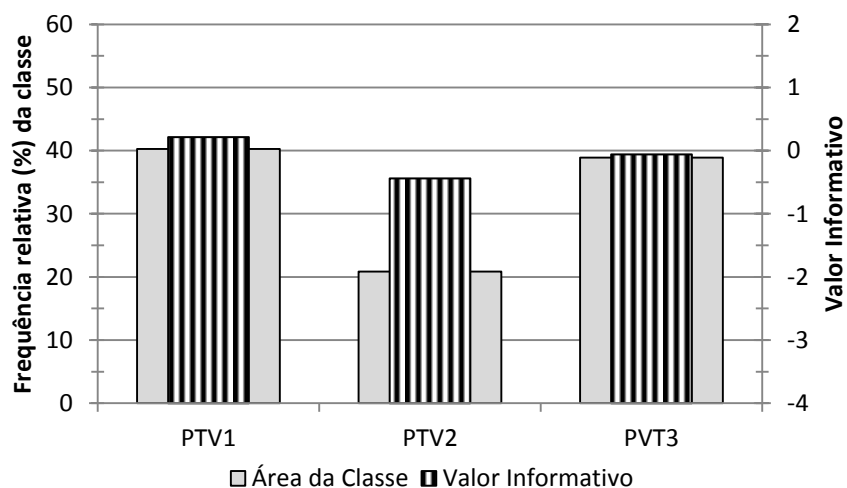


Figura 39 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de perfil transversal das vertentes (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

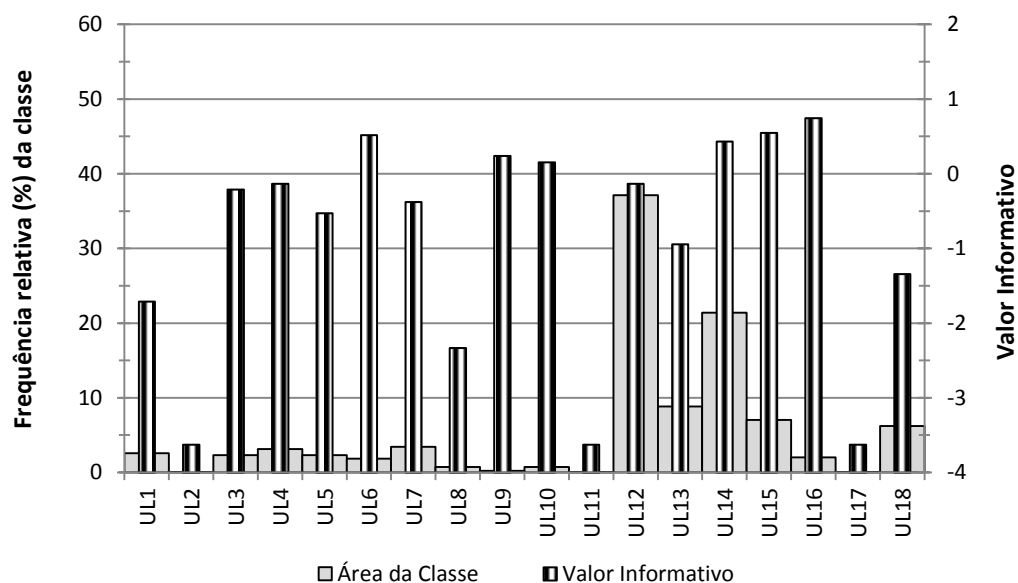


Figura 40 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de unidades litológicas (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

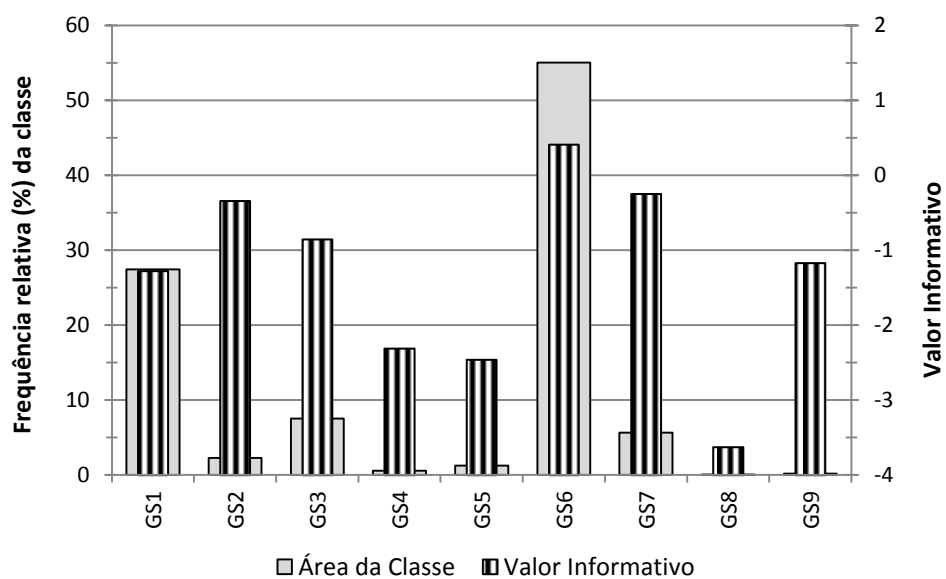


Figura 41 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de grupos de solos (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

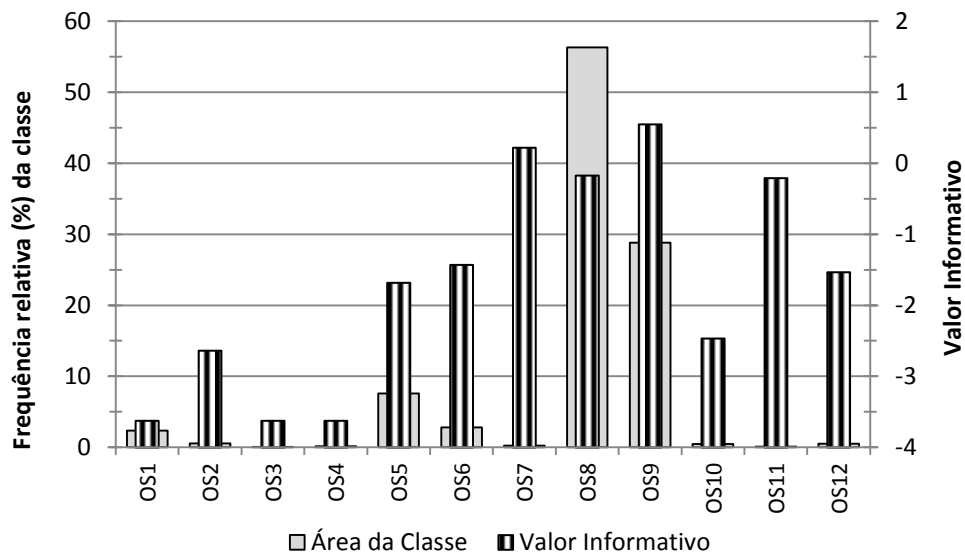


Figura 42 - Frequência relativa e Valor Informativo das classes de ocupação do solo (para explicação dos deslizamentos) nos concelhos da área de estudo.

4. MODELO DE SUSCEPTIBILIDADE AOS MOVIMENTOS DE VERTENTE

O modelo de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos na área de estudo foi efectuado com recurso ao método do Valor Informativo. Depois de calculados, os VI foram atribuídos à base de dados da respectiva variável de modo a serem, posteriormente, somadas através da ferramenta “*Raster Calculator*” do *software* ArcGIS 9.3. Deste processo resultou o mapa de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos nos concelhos da área de estudo (Fig. 43). Posteriormente os valores deste mapa foram divididos em 4 classes tendo em conta dois métodos de divisão em classes: quebras naturais (Fig. 44 e Quadro 13) e em quartis (Fig. 45 e Quadro 14).

Como se referiu anteriormente, o processo de classificação assenta em dois métodos de divisão de dados; o objectivo é fornecer uma visão complementar e mais completa daquela que seria obtida com a utilização de apenas um método de classificação, sabendo-se como a elaboração de mapas de avaliação de susceptibilidade com base em diferentes métodos de divisão em classes pode levar a diferenças muito significativas nos resultados finais (Garcia *et al.* 2007), mesmo em avaliações objectivas (método do Valor Informativo). A utilização destes dois métodos de classificação torna-se ainda mais relevante, tendo em conta que não foi possível identificar quebras significativas na curva de sucesso (ver ponto 5 deste capítulo), de forma a utilizar esta informação como

seria desejável, para proceder à classificação dos resultados de susceptibilidade. Assim, com as mesmas 4 classes, verifica-se que os limiares de cada classe de susceptibilidade são distintos, o que justifica um diferente fraccionamento da área de estudo pelas classes de susceptibilidade (Quadros 13 e 14)

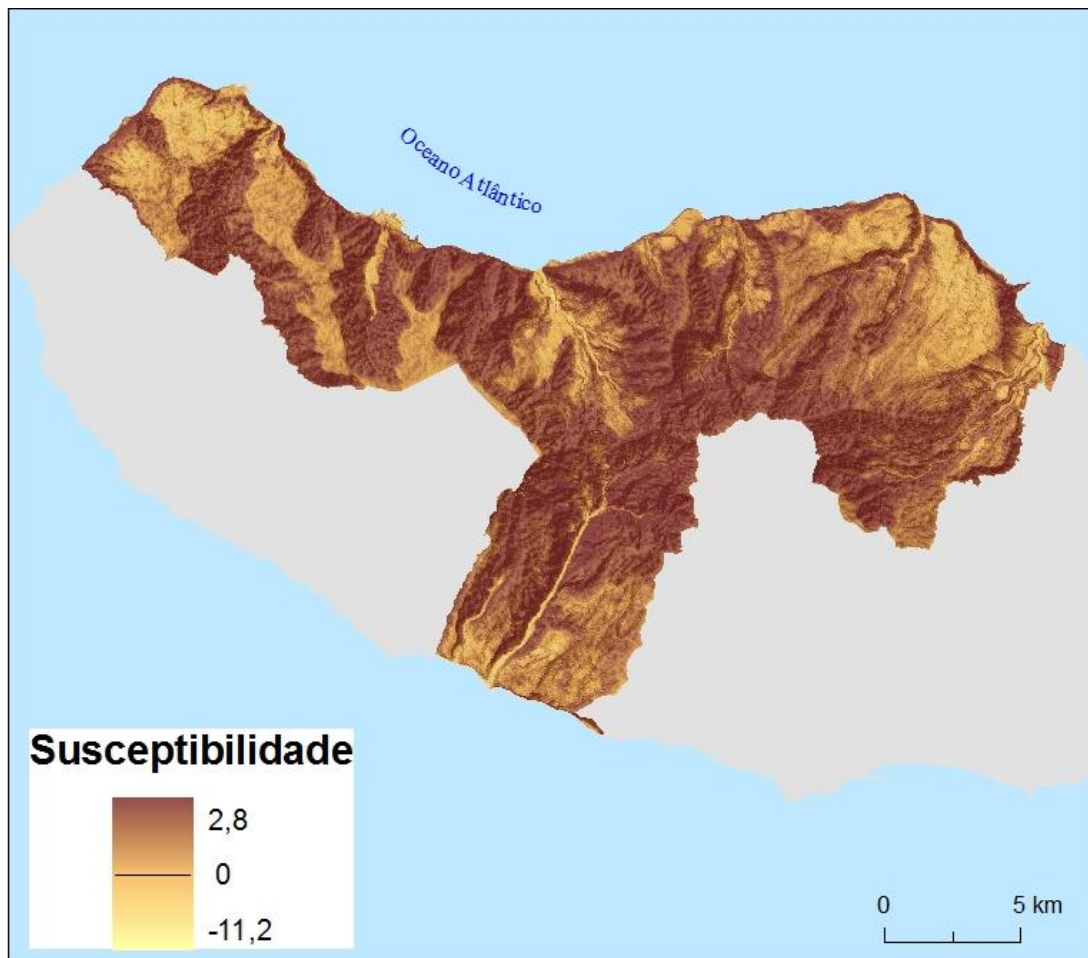


Figura 43 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos (valores contínuos), segundo o método do Valor Informativo, nos concelhos da área de estudo.

Em relação aos dois métodos de divisão em classes aqui utilizados, sublinha-se o facto de o método por “quebras naturais” ser mais adequado para este tipo de estudo do que o dos quartis, visto que este último tem em conta a partição dos *scores* em partes iguais, sendo que o critério de divisão em classes não possui uma relação com o tipo de dados que se analisam; por outro lado, a divisão por “quebras naturais”, que não obedece a uma distribuição estatística, leva em consideração a existência de limites naturais, pelo que, à partida, será o método que melhor descreve a realidade associada à distribuição da susceptibilidade associada aos deslizamentos (Garcia, 2002).

Quadro 13 - Matriz de classificação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quebras naturais.

| Classe de susceptibilidade | Valores limite das classes do VI | Fracção da área de estudo (%) | Fracção da área instabilizada validada pelo modelo (%) |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| Muito Elevada | 2,78 a -0,04 | 47,3 | 82,0 |
| Elevada | -0,04 a -2,24 | 24,1 | 15,2 |
| Moderada | -2,24 a -4,68 | 19,3 | 2,6 |
| Reduzida ou Nula | -4,68 a -11, 24 | 9,3 | 0,2 |

Quadro 14 - Matriz de classificação da susceptibilidade aos deslizamentos segundo o método do Valor Informativo, segundo a divisão de classes por quartis.

| Classe de susceptibilidade | Valores limite das classes do VI | Fracção da área de estudo (%) | Fracção da área instabilizada validada pelo modelo (%) |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| Muito Elevada | 2,78 a -0,88 | 25,0 | 56,0 |
| Elevada | -0,88 a -0,3 | 25,0 | 28,0 |
| Moderada | -0,3 a -2,7 | 25,0 | 14,0 |
| Reduzida ou Nula | -2,7 a -11, 24 | 25,0 | 2,0 |

Comparando os dois quadros em termos estatísticos, podemos constatar que além dos limiares das classes serem distintos, pode-se observar também que o valor da classe classificada como muito elevada pelo método de divisão em classes por quebras naturais é subvalorizada em 26% quando aplicado o método de divisão de classes por quartis, ou seja, no quadro 13 esta classe corresponde a 82,0% da fracção da área deslizada e no quadro 14 apenas equivale a 56%. Resumindo, para efeitos de identificação de áreas mais perigosas, seria admissível considerar apenas a classe “Muito Elevada” (que valida 82% da área deslizada) no caso da divisão segundo as quebras naturais, mas, no caso da divisão por quartis, seria necessário considerar, para além daquela, também a classe “Elevada” (que, em conjunto, validam 84% da área deslizada).

Outra análise que podemos retirar da comparação entre os dois quadros, é que os valores registados nas outras classes são sobrevalorizados pela divisão de classes em quartis, a classe classificada pela susceptibilidade nula ou reduzida a sobrevalorização é de 5 vezes, na classe de susceptibilidade moderada o valor de sobrevalorização é de quase 6 vezes e na classe classificada como elevada este valor é de quase 2 vezes.

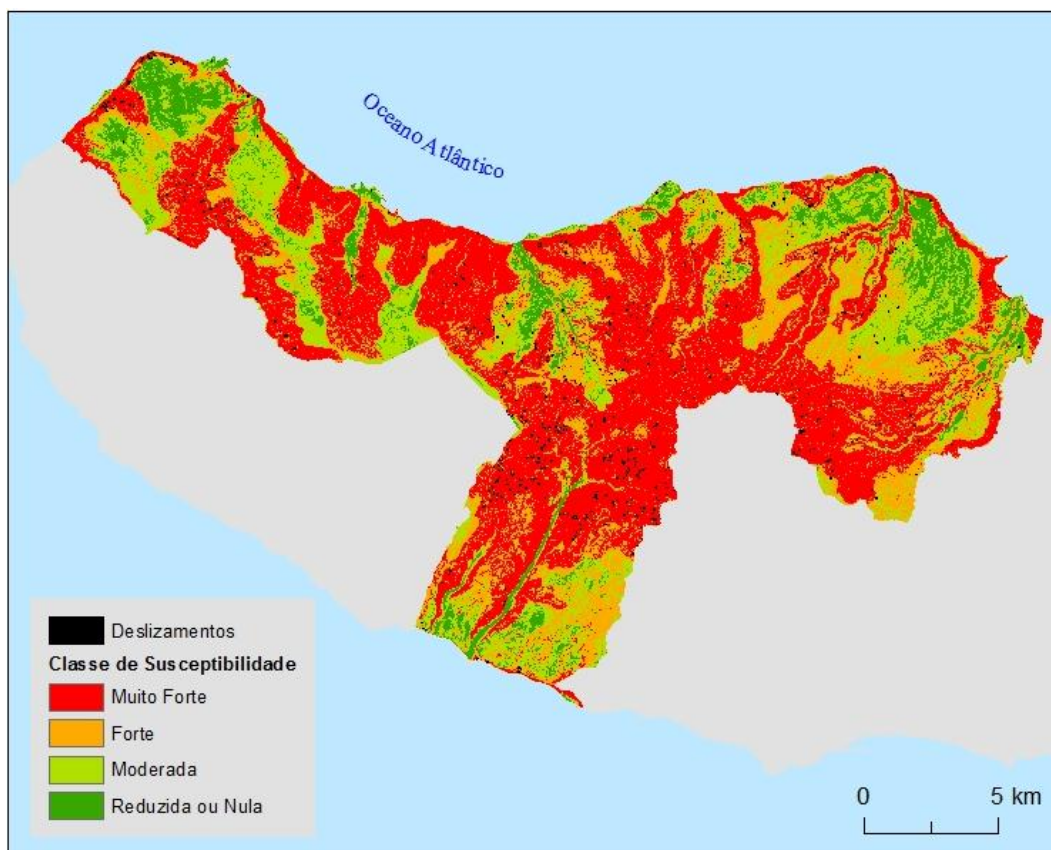


Figura 44 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quebras naturais, nos concelhos da área de estudo.

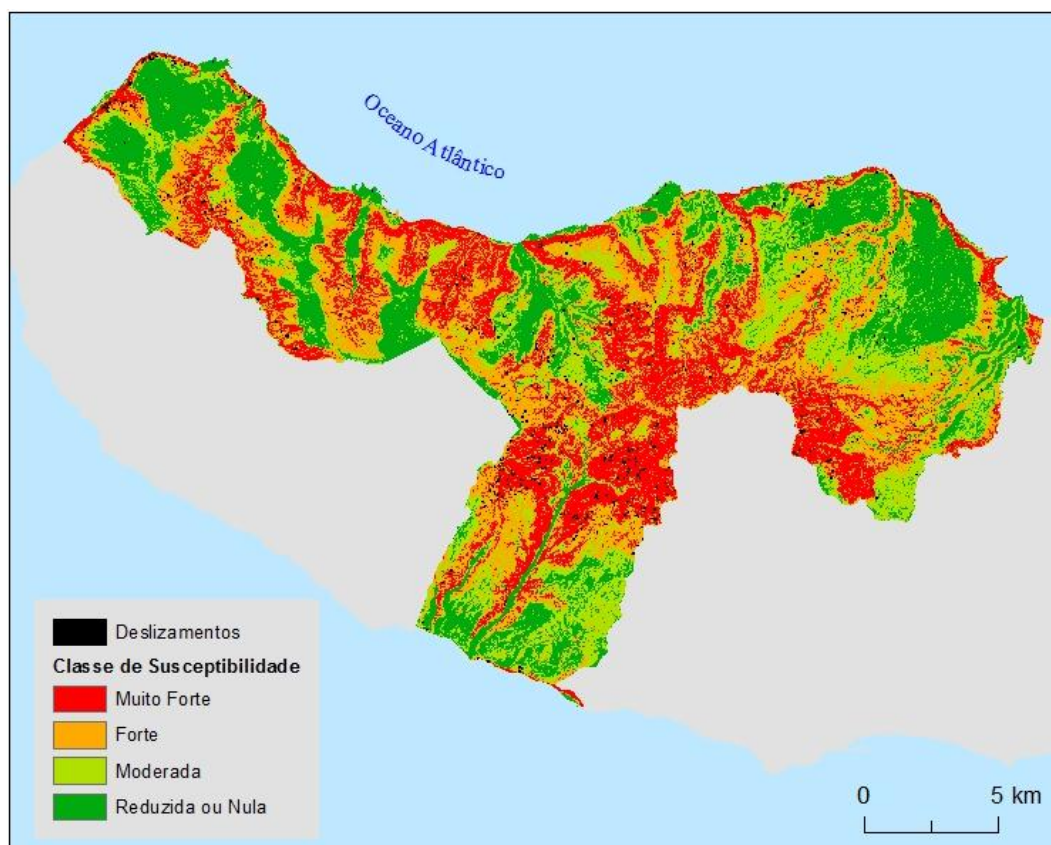


Figura 45 - Susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo, através da divisão de classes por quartis, nos concelhos da área de estudo.

Tendo em conta os mapas de avaliação de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos nos concelhos da área de estudo (Figs. 44 e 45), constata-se que as áreas de maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos apresentam, no essencial, uma coincidência com as vertentes com declive mais elevado. Há, também, uma forte relação com a presença de unidades litológicas constituídas por materiais pouco consolidados e alterados, portanto mais brandos e menos resistentes, como as rochas máficas alteradas e depósitos piroclásticos. Aparecem, ainda, associadas a áreas de florestas e de florestas abertas, vegetação arbustiva e herbácea e à classe de “terrenos acidentados” incorporada no tema dos grupos de solos. Todavia, tal como se demonstrou no cálculo do grau de associação entre variáveis espaciais independentes, a influência destas últimas classes de ocupação do solo e de tipo de solos reflectirá mais a influência directa do declive e da geologia do que propriamente a influência daquelas duas variáveis.

Geograficamente as áreas mais susceptíveis a deslizamentos localizam-se na parte central e nas arribas dos litorais norte e noroeste da área em estudo, com enfoque para as vertentes declivosas ao longo dos principais vales. As áreas menos susceptíveis, portanto, as áreas com condições desfavoráveis a ocorrência de deslizamento localizam-se basicamente aos fundos dos vales e nos sítios onde o declive não ultrapassa os 10° correspondentes aos planaltos e em alguns taludes.

5. VALIDAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE: CURVAS DE SUCESSO E PREDIÇÃO

A validação dos resultados é realizada através do cruzamento entre o mapa de susceptibilidade com valores contínuos e o mapa da distribuição espacial dos movimentos de vertente, sendo determinados os graus de ajuste entre os dados e os modelos (taxa de sucesso) e a respectiva capacidade preditiva (taxa de predição).

No caso da taxa de sucesso, a validação é processada com os mesmos dados de ocorrências do fenómeno que integraram a modelação. No caso da taxa de predição recorre-se a uma repartição dos dados da variável dependente (deslizamentos) em dois conjuntos. Neste estudo utilizou-se a repartição espacial dos deslizamentos e não a repartição temporal, uma vez que os dados de levantamentos dos deslizamentos não contêm atributo das datas de ocorrência. Assim, o total dos deslizamentos levantados foi

dividido em dois subconjuntos, com base num método de repartição aleatória, em que metade dos dados serviram para modelar e a outra metade serviu para validar os resultados do modelo (Fig. 46). Assim, as taxas de sucesso correspondem às curvas obtidas através do cruzamento dos mapas de susceptibilidade com os deslizamentos que lhe deram origem e as taxas de predição correspondem às curvas obtidas através do cruzamento dos mapas de susceptibilidade com um grupo de deslizamentos independente do grupo que serviu para gerar o modelo preditivo.

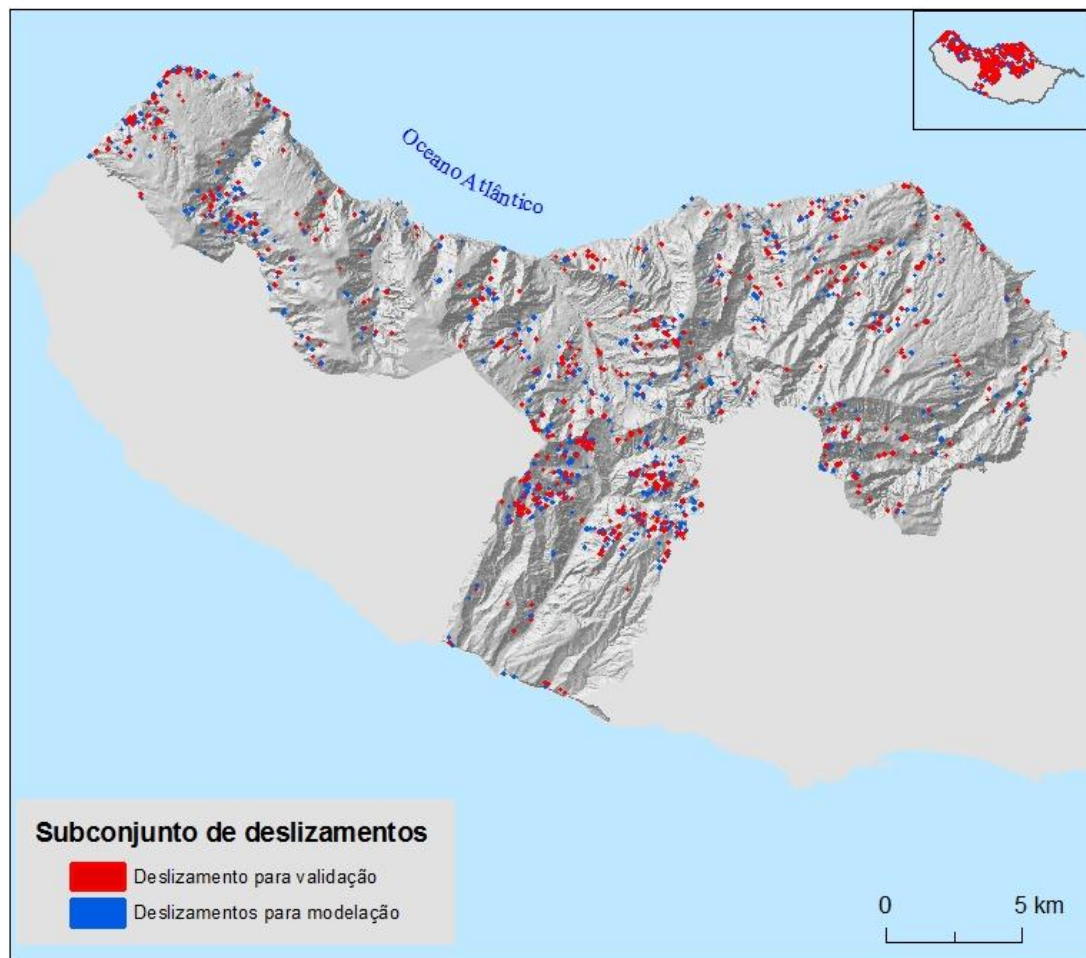


Figura 46 - Repartição espacial aleatória dos deslizamentos utilizados na modelação da taxa de predição

Para proceder ao cálculo da taxa de sucesso são necessários: os mapas finais com os valores de susceptibilidade de cada condição (ou célula); a área deslizada (caso houver) para cada condição; e a área que possui cada condição. Uma vez obtidos os dados anteriores é necessário dispor os valores de susceptibilidade de forma decrescente de modo a proceder ao cálculo das frequências acumuladas da área deslizada e da área ocupada por cada valor contínuo. Uma vez obtidas as Taxas de Sucesso e de Predição, é necessário calcular as respectivas áreas abaixo das curvas (AAC) de forma a quantificar

essas diferenças (Fabbri *et al.*, 2002) (ver Quadro I do Anexo). Assim, quanto mais próximo de 100% estiver o valor de AAC maior será a qualidade do modelo.

Para a construção das curvas é necessário calcular dois rácios, através das seguintes fórmulas (Fabri *et al.*, 2002):

$$Rácio1 = \frac{Us}{Ut} \cdot 100 \quad \text{Eq. [8]}$$

$$Rácio2 = \frac{Ums}{Um} \cdot 100 \quad \text{Eq. [9]}$$

onde:

Us = Unidades de terreno seleccionadas;

Ut = Número de unidades da área em estudo;

Ums = Número de unidades seleccionadas com movimentos;

Um = Número total de unidades instabilizadas na área estudada.

Após a construção das respectivas curvas de sucesso e predição é calculada a Área Abaixo da Curva (AAC) de acordo com Gorservski *et al.* (2000) e com Bi e Bennett (2003); a equação [10] avalia a qualidade preditiva global do modelo gerado, traduzida em valores entre 0 e 1.

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(Lsi - Li) \cdot \frac{ai + bi}{2} \right] \quad \text{Eq. [10]}$$

sendo:

$(Lsi - Li)$ = Amplitude da classe;

ai = Valor da ordenada correspondente a Li ;

bi = Valor da ordenada correspondente a Lsi .

A Curva de Sucesso e a Curva de Predição do modelo de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos nos concelhos da área de estudo estão representadas na Figura 47. A

primeira resulta da geração do modelo de susceptibilidade e a segunda foi utilizada para avaliar a capacidade preditiva aos deslizamentos.

Através da curva de sucesso, que nos fornece o grau de ajuste dos dados de entrada na modelação, verifica-se que nos 5% de área mais susceptível o modelo explica 19,1% dos movimentos utilizados na modelação, valor que aumenta para 31,5% quando se alarga a área mais susceptível para 10% da área total. Aos 40% da área total são explicados 75,5% do total dos movimentos, aumentando para 92,7% da área mais susceptível quando atinge 60% da área total.

A curva de predição dá-nos a informação da capacidade preditiva do modelo de susceptibilidade. Podemos observar que os valores não são muitos distantes dos da curva de sucesso: assim os 5% da área de estudo considerada mais susceptível conseguem validar 21,6% dos movimentos, e para 10% da área total a validação aumenta para 31,9% dos movimentos. Atendendo à interpretação da capacidade preditiva, num contexto sem ter horizonte temporal definido, podemos concluir que cerca de 21,6% dos deslizamentos que vão ocorrer nos concelhos da área em estudo deverão concentrar-se nos 5% da área classificada como mais susceptível da área total, 31,9% da instabilidade deverá ocorrer dentro dos 10% da área mais susceptível e 75,1% dos movimentos deverão ocorrer nos 40% de área mais susceptível.

Tendo em conta o grau de ajuste do modelo, verifica-se que aos 50% da área total da são explicados 84% dos movimentos e a totalidade dos movimentos utilizados na modelação é explicada aos 84% da área total. Por outro turno, através da capacidade preditiva do modelo aos 50% da área total são validados 81% deslizamentos e a totalidade dos movimentos ocorridos na área de estudo são validados em 87% da área total.

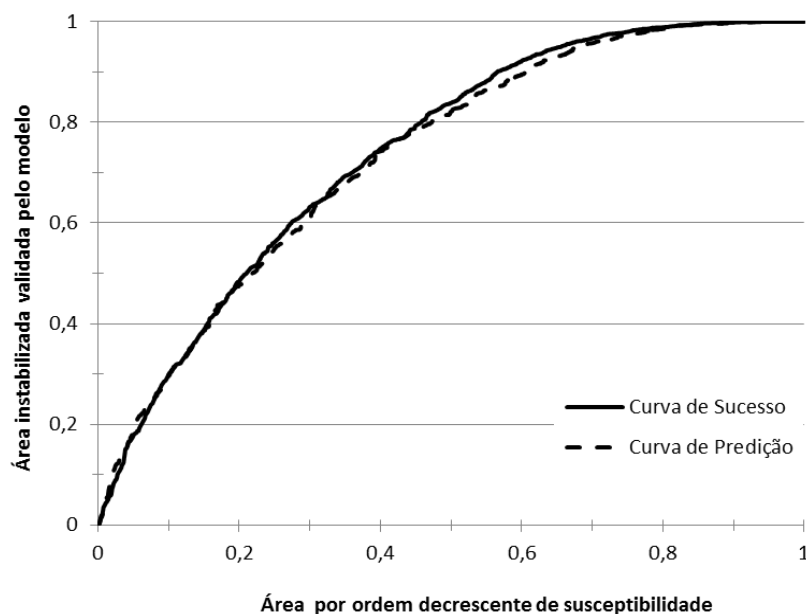


Figura 47 - Curva de sucesso e Curva de predição do modelo de avaliação da susceptibilidade aos deslizamentos, segundo o método do Valor Informativo.

O Quadro 15 sistematiza a leitura dos valores das curvas e os respectivos valores de área abaixo da curva (AAC). No entanto, podemos observar que os valores das duas curvas são sensivelmente semelhantes bem como os valores da área abaixo da curva (AAC).

Quadro 15 - Percentagem de deslizamentos correctamente classificados e as respectivas AAC.

| Área classificada como mais susceptível (%) | | 5 | 10 | 20 | 40 | 60 | AAC |
|--|------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Deslizamentos correctamente classificados (%) | Taxa de Sucesso | 19,1 | 31,5 | 49,7 | 75,5 | 92,7 | 0,739 |
| | Taxa de Predição | 21,6 | 31,9 | 48,7 | 75,1 | 89,9 | 0,732 |

Atendendo às curvas de sucesso e de predição, utilizadas para estabelecer as classes de susceptibilidade representados no quadro, foram utilizados para medir a qualidade do modelo através do cálculo da área abaixo da curva (AAC). Deste modo, com as AAC de 74% e 73% respectivamente, constata-se que o modelo apresenta os valores relativamente elevados e mostra que os resultados são aceitáveis, mas abaixo do que seria desejável. No entanto, o resultado do modelo poderá indicar que alguns dos factores de predisposição utilizados na modelação à ocorrência do fenómeno podem,

para além de serem redundantes, possuir problemas relativos à sua cartografia, com alguma influência no resultado final; mais do que isso, é expectável considerar que possam ter ocorrido alguns erros no levantamento e delimitação dos deslizamentos, os quais, devido à ausência de trabalho no terreno, não foi possível confirmar.

Ao analisarmos somente os valores das AAC e comparando as duas curvas podemos verificar que a curva de sucesso apresenta uma qualidade ligeiramente superior ao da curva de predição e este facto pode ser explicado pelo facto de a modelação efectuada para construir a curva de sucesso leva em consideração a totalidade dos movimentos utilizados para construir o modelo e a curva de predição apenas utiliza uma parte dos deslizamentos para modelação e a outra parte, não coincidente, para a validação.

Considerações Finais

A avaliação de susceptibilidade à ocorrência dos deslizamentos nos concelhos da área de estudo, baseada exclusivamente em levantamentos efectuados de forma sistemática a partir da interpretação de ortofotos de grande resolução, implicou uma abordagem estatística dos parâmetros morfométricos e dos principais factores condicionantes dos deslizamentos, comparando os resultados com a distribuição espacial das áreas instabilizadas. Os procedimentos de aquisição e processamento dos dados, identificação e levantamentos dos deslizamentos, bem como a análise da susceptibilidade através do método estatístico bivariado e a avaliação da taxa de sucesso e taxa de predição, constituíram os principais objectivos deste trabalho.

A dificuldade encontrada no âmbito da cartografia dos deslizamentos em ortofotos, devido à interferência por nuvens e pelas sombras das vertentes em alguns sítios da área de estudo fizeram com que não fosse possível fazer levantamentos de todos os “possíveis” deslizamentos ocorridos, em que a base de dados dos deslizamentos podia ter sido muito mais alargada, com reflexos nos resultados finais, e com isso fazer uma avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos na área de estudo melhor e mais completa.

Num estudo como este, possuir uma base de dados robusta e credível dos dados de entrada constitui passo fundamental de todo o processo de modelação. Todavia, um inventário da distribuição espacial de deslizamentos ocorridos e a identificação e caracterização dos factores condicionantes são igualmente fundamentais. No entanto, salienta-se o facto da ausência de validação no campo dos deslizamentos levantados utilizados na modelação e consequentemente a impossibilidade da classificação dos deslizamentos por tipologias podem ter influenciado os resultados finais do modelo e ter contribuído para que os resultados não tenham sido ainda melhores.

A relação espacial entre os deslizamentos ocorridos e os factores condicionantes indicam as classes de cada variável que são mais afectadas por deslizamentos bem como o valor da probabilidade condicionada, que nos permite aferir preliminarmente as classes das variáveis mais influentes na ocorrência do fenómeno.

A relação entre as variáveis (independentes) consideradas factores condicionantes utilizadas para a modelação da susceptibilidade neste estudo, revelou que esses são relativamente independentes entre eles, com a excepção da variável litologia e grupos

de solos que demonstraram ser redundante a utilização dos dois na modelação, pelo facto, de possuírem uma relação intrínseca e de se apresentarem valor de correlação bastante significativa entre eles. Em geral os valores da correlação são relativamente baixos, indicando que variáveis escolhidas são aceitáveis como factores condicionantes à ocorrência de deslizamentos nos concelhos da área de estudo.

O método do valor informativo (VI) revelou ser simples e prático adequado ao estudo de dimensão municipal como o caso deste trabalho. A partir dos *scores* dos valores informativos de cada classe de cada variável independente considerada neste estudo, podemos considerar as variáveis “unidades litológicas”, “exposição das vertentes”, “declive” e “ocupação do solo” como as mais influentes na explicação na ocorrência de deslizamentos na área de estudo. No entanto, embora a variável “exposição das vertentes” e “unidades litológicas” possuam mais classes com *scores* de VI positivos, 4 e 6 respectivamente, considera-se que é a variável “declives” com 2 classes de *score* de VI positivo a variável mais importante para a explicação à ocorrência de deslizamentos. Para esta situação, concorre o facto haver uma grande concordância, ao longo da maior parte da área de estudo, entre a presença de movimentos e declives elevados, o que se traduz num Valor Informativo elevado nestas classes.

Em termos gerais poder-se-á considerar que a área de estudo como uma área muito susceptível aos deslizamentos. Inserida no contexto insular, de natureza vulcânica, situada na faixa intertropical, na área de estudo prevalecem as combinações de factores como declives elevados ($>35^\circ$) e materiais de composição máfica, fragmentados e alterados em terrenos acidentados com vegetação herbácea e arbustiva, o que traduz condições favoráveis à ocorrência de deslizamentos. As áreas com menos ou com ausência de instabilidade, por conseguinte, as áreas que reúnem condições desfavoráveis a ocorrência dos deslizamentos, são onde os declives não ultrapassam 10° , constituídas por depósitos sedimentares marinhos, cascalheiras e areia de praia, em grupos de solos correspondentes aos vertisolos e fluvisolos.

Espacialmente conclui-se que as distribuições das áreas mais susceptíveis, ou seja, mais perigosas localizam-se nas vertentes da cadeia de montanha do sector central, que faz de barreira entre a parte sul e norte, e em alguns sectores de vertentes dos principais cursos de água, e nas arribas do sector norte e noroeste. No sentido oposto, as áreas menos perigosas, estão localizadas basicamente nos sectores baixo de alguns fundo de vale, no lugar do Planalto Central e outras áreas semelhantes dos sectores nordeste e noroeste.

No que diz respeito aos resultados obtidos através da avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos fornecida pela curva de sucesso e validada pela curva de predição permitem concluir que cerca de 30%, 50% e 75% dos futuros deslizamentos no território dos municípios de Porto Moniz, Ribeira Brava, Santana e São Vicente deverão ocorrer na área classificada como sendo mais susceptíveis aos deslizamentos e que correspondem respectivamente a 10%, 20% e 40% da área total. Em suma, ambas as taxas correspondem a resultados aceitáveis, comprovadas pelos valores das AAC.

Bibliografia

- Almeida, A. (coord.) (2010) - Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões na Ilha da Madeira – *Relatório Base*, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira, Lisboa.
- ANPC (2009a) - Manual de Apoio à Elaboração e Operacionalização de Planos de Emergência de Protecção Civil. *Cadernos Técnicos*, PROCIV, nº 3. Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), Carnaxide. Consultado em www.proteccaocivil.pt/cadernos/7.pdf
- ANPC (2009b) - Guia para a Caracterização de Risco no Âmbito da Elaboração de Planos de Emergência de Protecção Civil. *Cadernos Técnicos*, PROCIV, nº 9, Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), Carnaxide. Consultado em www.proteccaocivil.pt/Documents/CTP9_www.pdf
- AREAM (2006) - Levantamento do Potencial Energético da Biomassa Florestal. Relatório Síntese. *PRODERAM*. Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira.
- Bi, J. e Bennett, K. P. (2003) – Regression Error Characteristic Curves. *Proceedings of the International Conference on Machine Learning* (ICML – 2003). Washington DC.
- Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Antonini, G.; Galli, M. Cacciano, M.; Castellani, M.; Salvati, P. (2002) – A Geomorphological Approach to the Estimation of Landslides Hazards and Risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2: 57-72.
- Carrara, A. (1993) – A Multivariate Model for Landslide Hazard Evaluation. *Mathematical Geology*, 15: p. 403-526.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Antonini, G.; Galli, M.; Ardizzone, F.; Fossati, D.; Laffi, R.; Mazzoccola, D.; Sciesa, E.; Crosta, G.; Frantini, P. (2000) – Geographic Information Technology to Assess Landslide Hazard in Regional Environment Planning. *Third Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems*. pp. 61-65.
- Carvalho, A. M. Galopim de, e Brandão, J. M. (1991) - *Geologia do Arquipélago da Madeira*. Publicação do Museu Nacional de História Natural, 170 pp.
- Chung, C.J. e Fabbri, A. (2003) – *Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping*. *Natural Hazards*, 30 (3): p. 451-472.
- Crozier, M.; Glade, T. (2005) – Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.), *Landslide hazard and risk*. John Wiley e Sons, Chichester, p. 1-40.
- Cruden, D.M. (1991) - A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, Paris, p.27-29.

- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996) – Landslide Types and Processes. In Turner, A.K.; Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, *National Academy Press*, Washington D.C., p. 36-75.
- Decreto-Lei n.º 134/2006, de 25 de Julho, publicado no Diário da República, n.º 142, I Série. Disponível em www.proteccaocivil.pt/Legislacao/.../DL%20134-%202006-SIOPS.p...
- Decreto-Lei n.º 239, que estabelece o regime jurídico da Reserva Ecológica Nacional (REN). Disponível em dre.pt/pdf1sdip/2012/11/21200/0630806346.pdf
- Decreto Legislativo Regional n.º 17/2009/M, de 30 de Junho de 2009. Disponível em [www.proteccaocivil.pt/Legislacao/.../Decreto Regional 17 2009 M....](http://www.proteccaocivil.pt/Legislacao/.../Decreto%20Regional%2017%202009%20M....)
- Decreto Legislativo Regional n.º 16/2009/M, de 30 de Junho de 2009. Disponível em [www.proteccaocivil.pt/Legislacao/.../Decreto Regional 16 2009 M....](http://www.proteccaocivil.pt/Legislacao/.../Decreto%20Regional%2016%202009%20M....)
- DGRF (2008) - Guia Técnico para Elaboração do Plano Operacional Municipal 2008. MADRP/Direcção Geral de Recursos Florestais (DGRF) – Gabinete de Apoio aos GTF. Lisboa.
- DRA (1992) - Carta de Solos da Ilha da Madeira, Direcção Regional de Agricultura (DRA), Secretaria Regional de Economia, R. A. da Madeira.
- DRE (2010) - Anuário Estatístico da Região Autónoma da Madeira – 2009. DRE Funchal.
- DRF (2008) – 1.º Inventário Florestal da Região Autónoma da Madeira. Relatório Final. Secretaria Regional de Ambiente e Recursos Naturais, Direcção Regional da Floresta (DRF), Região Autónoma da Madeira.
- Fabbri, A.; Chung, C.F.; Napolitano, P.; Remondo, J.; Zêzere, J.L. (2002) – Prediction Rate Functions of Landslide Susceptibility Applied in the Iberian Peninsula. In: Brebbia C.A. (Ed.), *Risk Analysis III, Series: Management Information Systems* vol. 5. WIT Press, Southampton, pp. 703-718.
- Faria, J.M.R. Godinho, S.F., (1983) - O clima de Portugal, Fascículo XXIX, “Intensidade, duração e frequência da precipitação no arquipélago da Madeira”, *Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*.
- Fernandes, M. (2009) – *Riscos no Concelho de Ribeira Brava Movimentos de Vertente Cheias Rápidas e Inundações*. Tese de Mestrado em Dinâmicas Naturais e Riscos Naturais, Área de Especialização em Riscos Geomorfológicos e Hidrológicos. Faculdade de Letras Universidade de Coimbra. 328 pp.
- Ferreira, A. de Brum (1982) – O Regime das Chuvas na Madeira e Porto Santo. Suas relações com a Circulação de Altitude. *Actas do II Colóquio Ibérico de Geografia*, Lisboa, Vol. I, pp. 265-276.

- Ferreira, A. de Brum (1984) – *Os Ventos Dominantes e a Distribuição das Chuvas na Ilha da Madeira*. Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, 1º Vol., pp. 231-243.
- Garcia, R. (2002) – *Avaliação do Risco de Movimentos de Vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras)*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ambiente. Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa. 182pp.
- Garcia, R.; Zêzere, J. L.; Oliveira, S. (2007) - A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, Volume V, APGeom, Lisboa, p. 265-279. Disponível em http://riskam.ul.pt/images/pdf/comlivactnac_2007_processo_classificacao_dados.pdf
- Glade, T. Crozier, M.J. (2005) – The Nature of Landslide Hazard and Impact - In: Glade, T.; Anderson, M. Crozier, M. [Hrsg]: *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, p. 43-74.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. e Foltz, R. B. (2000) – Spatial Prediction Of Landslide Hazard Using Logistic Regression and GIS. *4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospect and Research needs*. Banff, Alberta.
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. (1999) – Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy. *Geomorphology* 31: pp. 181-216.
- Guzzetti, F. (2004) – Book Review of “Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms”. *Natural Hazard and Earth Systems Sciences* 4: pp. 531-531.
- Guzzetti, F. (2005) – Landslide Hazard and Risk Assessment: Concepts, Methods and Tools for the Detection and Mapping of Landslides, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. *Dissertation*, Bonn.
- Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F. (2006) – Estimating the Quality of Landslide Susceptibility Models. *Geomorphology*, 81: pp. 166-184.
- Henriques, C. S. (2009) – *Dinâmica de Vertente no Contexto da Reserva Ecológica Nacional: o Caso de Estudo do Concelho de Caldas da Rainha*. Tese de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Aplicados ao Ordenamento. Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa. 140pp.
- Hutchinson, J. N. (1988) – General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslide in Relation to Geology and Hydrogeology. *International Symposium on Landslides*, Lausanne, vol. 1 Balkema, Rotterdam, pp. 3-35.

- Hutchinson, J.N. (1995) – Landslide hazard assessment, Keynote paper. In: Bell (ed), *Landslides Proceedings of the 6th international Symposium on landslides*, Balkema, Rotterdam, pp. 1805-1841.
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Branco, M. C., Zêzere, J. L. (2009) - *Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal*. Autoridade Nacional de Protecção Civil - Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano e Instituto Geográfico Português. Disponível em www.proteccaocivil.pt/Documents/guia_metodologico_SIG.pdf
- Lei n.º 65/2007, de 12 de Novembro, publicada no Diário da República, n.º 217, I Série. Disponível em dre.pt/pdf1s/2007/11/21700/0835308356.pdf
- Lei n.º 27/2006, de 3 de Julho, publicada no Diário da República, n.º 126, I Série (Lei de Bases da Protecção Civil). Disponível em www.dre.pt/.../dr1s.exe?...dr...Lei...
- LNEG (2009) - Carta Geológica Simplificada da Ilha da Madeira à escala 1:80.000. Coordenação de M. Luísa Ribeiro. *Laboratório Nacional de Energia e Geologia*. Direcção Regional do Comércio, Indústria e Energia. Projecto co-financiado pela Região Autónoma da Madeira.
- Lopes, S. S, AGUIAR, N. (2009b) - Caracterização e Monitorização da Bacia Hidrográfica de São Vicente. Relatório Técnico DHTE 03, *Laboratório Regional de Engenharia Civil*.
- Loureiro, J. J. M. (1983). Monografia Hidrológica da Ilha da Madeira. Recursos Hídricos, Lisboa, 5 (2): pp. 53 - 71.
- Mata, J.M.L. da S. (1996) - *Petrologia e Geoquímica das Lavas da Ilha da Madeira: Implicações para os Modelos de Evolução do Manto Terrestre*. Tese de Doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa, 471p.
- Menezes, D. (coord) (2004) – A Floresta Laurissilva da Madeira, Património Mundial. Parque Natural da Madeira. Madeira, 2004, pp.30.
- Nguyen, H., Fernandez-Stegeer, T., Rodrigues, D, e Wiatr, T. (2010) - Rockfall Hazard Assessment by Using Terrestrial Laser Scanning. A Case Study in Funchal (Madeira). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 12: EGU2009-13041.
- Nunes, J. C. (1998) - Paisagens Vulcânicas dos Açores. Amigos dos Açores, Ponta Delgada, 54 p.
- Piedade, A. (2009) – *Modelação Espacial em Sistemas de Informação Geográfica da Susceptibilidade a Deslizamentos na Área de Lousã-Loures*. Tese de Mestrado em Gestão do Território, Área de Especialização em Detecção Remota e

Sistemas de Informação Geográfica. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa. 142 pp.

- Popescu, M. (1994) – A Suggested Method for Reporting Landslide Causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50: pp. 71-74.
- Prada, S.; Gaspar, M. A.; Silva, M. O.; Cruz, J. V.; Portela, M.; Hora, G. R. (2003) - Recursos hídricos da ilha da Madeira. Comunicações do *Instituto Geológico e Mineiro*, 90, pp. 125 - 142.
- Quintal, R. (1999a) – “Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX”. *Territórium. Revista de Geografia Física aplicada ao Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais*. N.º 6, p. 31-48. Minerva. Coimbra.
- Ribeiro, O. (1985) - A Ilha da Madeira até Meados do século XX. Estudo Geográfico. *Instituto de Cultura e Língua Portuguesa*. Lisboa.
- Ribeiro, J. L. (2010) - Riscos Costeiros - Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território. *Caderno Técnico PROCIV* #15. ANPC / DNPE. Lisboa, 155 p.
- Ricardo, R. Pinto; Câmara, E.M. Silva da; Ferreira, M.A. Melo (Coordenação) (1992) - *Carta dos solos da Ilha da Madeira*, Carta de Solos à escala 1:50.000 e Notícia Explicativa. Centro de Estudos de Pedologia (IICT), Instituto Superior de Agronomia (UTL), Centro de Pedologia da Universidade Técnica de Lisboa, Direcção Regional de Agricultura da Madeira. Governo Regional da Região Autónoma da Madeira, Secretaria Regional de Economia, Direcção Regional de Agricultura. 162p.
- Reis, E. Zêzere, J. L. Vieira, G. T; e Rodrigues, M. L. (2003) – Integração de Dados Espaciais em SIG para Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Deslizamentos. *Finisterra*, XXXVIII, 76, 2003, pp. 3-34.
- Reis, E. (2006) – *As Bacias Hidrográficas das Ribeiras da Serra de Grândola. Dinâmica Hidrológica e Factores Condicionantes*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa, 736 pp.
- Rodrigues, D. e Ayala-Carcedo, F. J. (2000) – Rockfalls and Rockslides in Madeira. *Workshop on Advanced Techniques for the assessment of Natural Hazards in Mountain Areas*. Innsbruck, 109 pp.
- Rodrigues, D. e Ayala-Carcedo, F. J. (2002a) - Slides in Madeira Island. I.S.R.M - *International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions*. Funchal, p. 223-230.
- Rodrigues, D. (2005) - *Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira. Aplicação ao caso de Machico*. Tese de Doutoramento em Geologia. Universidade da Madeira. Funchal, 382 pp.

- Rodrigues, D., Tavares, A. e Abreu, U. (2010) - Movimentos de vertente na ilha da Madeira. Eventos de Dezembro de 2009 e de Fevereiro de 2010. *e-Terra*. Vol. 9, nº 7, 4 pp.
- Silva, J.; Almeida, F. e Gomes, C. (2006) - Impactos na estabilidade de estruturas e hidrogeologia do ambiente envolvente a obras de construção com grande desenvolvimento subterrâneo na baixa citadina do Funchal. *10º Congresso Nacional de Geotécnica*, Lisboa, Volume 3, pp.731-740.
- Silva, J.; Almeida, F. e Gomes, C. (2010) – *Enxurradas e Inundações na Madeira*. DNOTICIAS.pt - Serviço de documentação e impressão. Consultado em geomuseu.ist.utl.pt/MINGEO2010/.../Madeira%20DN.pdf
- Teixeira, M. (2005) - Movimentos de Vertente. Factores de Ocorrência e Metodologia de Inventariação. *Associação Portuguesa de Geólogos*, 12pp.
- Terzaghi, K. (1952) – *Mecanismo dos Escorregamentos de Terra*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, separata nº467, São Paulo.
- Utecht, S.; Fernandez-Steege, T.; Rodrigues, D.; Gruntzer, C.; Reicherter, K. (2008) - *LIDAR Investigations on Debris Flows*. A case Study from Madeira. Geo2008. Aachen.
- Varnes, D.J. (1978) – Slope Movement Types and Processes. In Schuster, R.L.; Krizek, R.J. (Eds.) - *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report, 176, Washington D.C., p.11-33.
- Varnes, D. J. (1984) – Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice, UNESCO, France, 63 pp.
- Wiatr, T., Reicherter, K., Fernandez-Steege, T. e Rodrigues, D. (2009) - Mass movement monitoring by Terrestrial Laser Scanning on Madeira Island (Portugal). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 11: EGU2009-9006.
- Working Party on World Landslide Inventory, UNESCO (1993) - Multilingual landslide glossary. *International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society*. Richmond. Disponível em <http://www.cgs.ca/pdf/heritage/Landslide%20Glossary.pdf>
- Yan, T. Z. (1988) – Recent Advances of Quantitative Prognoses of Landslides in China. *International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1988, vol. 2 Balkema, Rotterdam, pp. 1263-1268.
- Yin, K. L. e YAN, T. Z. (1988) – Statistical Prediction Models for Slope Instability of Metamorphose Rocks. *International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1988, vol. 2 Balkema, Rotterdam, pp. 1269-1272.
- Zbyszewski, G.; Ferreira, O.V. Medeiros, A.C.; Aires-Barros, L.; Silva, L.C.;Munhá, J.M. e Barriga, F. (1975) - *Notícia explicativa das folhas A e B* (ilha da Madeira) da Carta Geológica de Portugal: 1/50 000. Serviços Geológicos de Portugal.

- Zêzere, J.L. (2000) – *A classificação dos Movimentos de Vertente. Tipologia, Actividade e Morfologia*. Apontamentos de Geografia, série investigação, nº6, CEG, Lisboa.
- Zêzere, J. L. (2002) – *Landslide Susceptibility Assessment Considering Landslide Typology. A case Study in the Area North of Lisbon (Portugal)*. *Natural Hazard and Earth Systems Sciences* (2002) 2: 73-82 pp. European Geosciences Union 2004.
- Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.; Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G. e Ferreira, A. B. (2004) – *Integration of Spatial and Temporal Data for the Definition of Different Landslide Hazard Scenarios in the Area North of Lisbon (Portugal)*. *Natural Hazard and Earth Systems Sciences* (2004) 4: 133-146 pp. Consultado em www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/4/133/2004/nhess-4-133-2004.pdf.
- Zêzere, J. L. (2005b) – *Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos*. Centro de Estudos Geográficos, Relatório nº. 41, Lisboa.
- Zêzere, J.L. (2007) – *Riscos e Ordenamento do Território*. *Inforgéo*, 20/21, Ordenamento Territorial, Associação Portuguesa de Geógrafos: p.59-63.

ANEXOS

Quadro 1- Modo de elaboração da taxa de sucesso com base em condições hipotéticas.

Extraído de Henriques, 2009.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| | Condições únicas resultantes do cruzamento dos factores | Valor de suscepti- bilidade | Área total (m ²) | Área deslizada (m ²) | Área total acumulada | Área deslizada acumulada | Cálculos para AUC | Cálculos para AUC | AUC |
| 1 | | | | | 0 | 0 | | | |
| 2 | Declive 1; Exposição1 | B5 | C2 | D2 | $\frac{C2}{\Sigma(C)}$ | $\frac{D2}{\Sigma(D)}$ | $E2 - E1$ | $\frac{F2+F1}{2}$ | $G2 \times H2$ |
| 3 | Declive 2; Exposição1 | B4 | C3 | D3 | $\frac{(C3+C2)}{\Sigma(C)}$ | $\frac{(D3+D2)}{\Sigma(D)}$ | $E3 - E2$ | $\frac{F3+F2}{2}$ | $G3 \times H3$ |
| 4 | Declive 1; Exposição2 | B3 | C4 | D4 | $\frac{(C4+C3+C2)}{\Sigma(C)}$ | $\frac{(D4+D3+D2)}{\Sigma(D)}$ | $E4 - E3$ | $\frac{F4+F3}{2}$ | $G4 \times H4$ |
| 5 | Declive 2; Exposição2 | B2 | C5 | D5 | $\frac{(C5+C4+C3+C2)}{\Sigma(C)}$ | $\frac{(D5+D4+D3+D2)}{\Sigma(D)}$ | | $\frac{F5+F4}{2}$ | $G5 \times H5$ |
| 6 | | | $\Sigma(C)$ | $\Sigma(D)$ | | | $E5 - E4$ | | $\Sigma(I)$ |



Figura 1 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Santana: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.

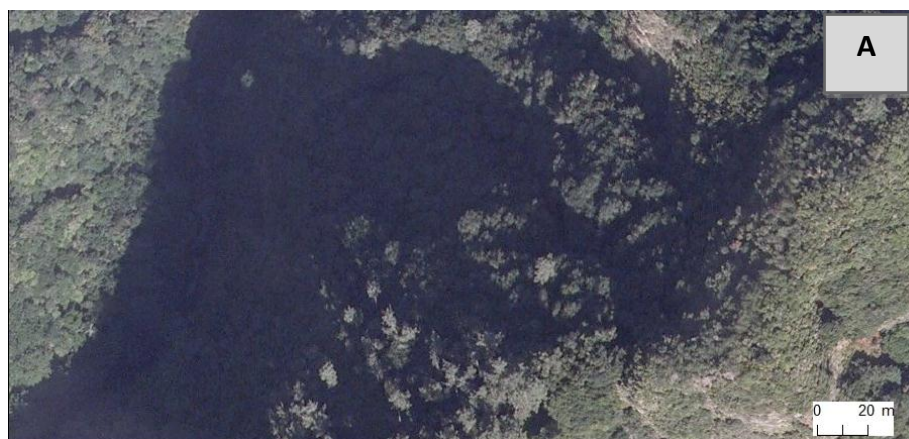


Figura 2 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Porto Moniz: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.

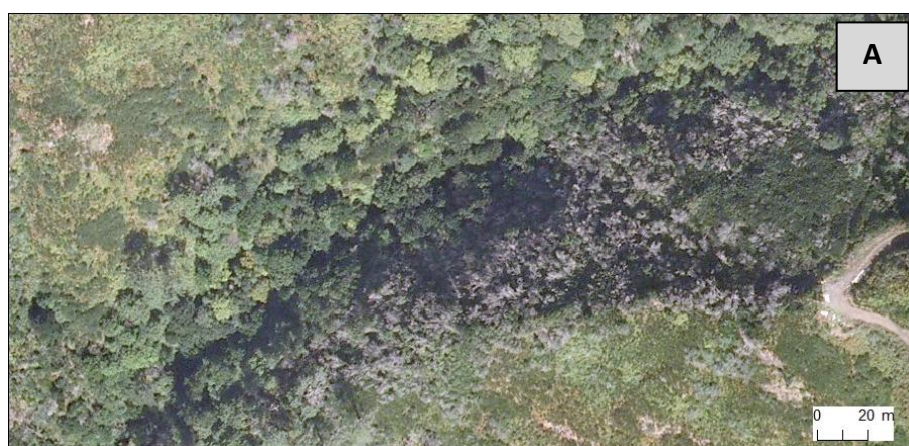




Figura 3 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.



Figura 4 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Ribeira Brava: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.

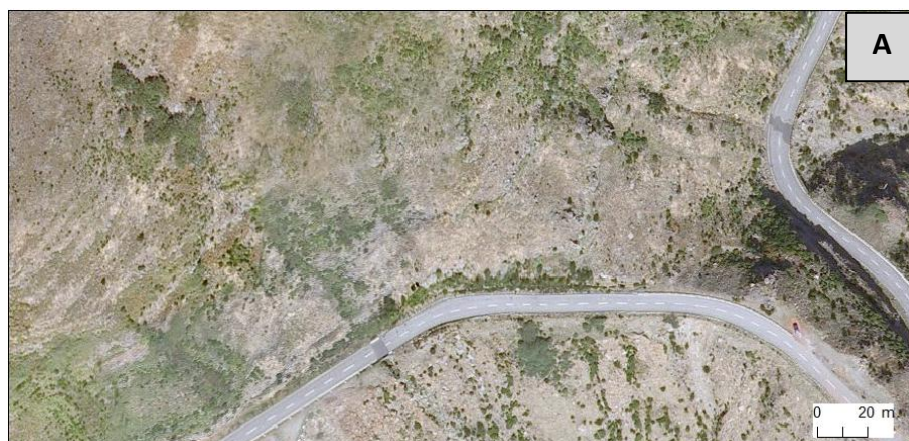


Figura 5 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de São Vicente: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.





Figura 6 - Exemplo de cartografia de deslizamentos identificados (polígonos a vermelho) numa área do concelho de Porto Moniz: A) Ortofoto de 2007; B) Ortofoto de 2010.